



TESIS- TE142599

**PENALAAN OPTIMAL *POWER SYSTEM STABILIZER*
(PSS) MENGGUNAKAN *BAT ALGORITHM* (BA) PADA
SISTEM KELISTRIKAN 500 KV JAWA-BALI**

IRNA TRI YUNIAHASTUTI
2214201001

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr. Eng. Ir. Imam Robandi, M.T.

**PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016**



THESES- TE142599

**OPTIMAL TUNNING *POWER SYSTEM STABILIZER*
(PSS) USING *BAT ALGORITHM* (BA) AT ELECTRICAL
SYSTEM 500 KV OF JAVA-BALI**

IRNA TRI YUNIAHASTUTI
2214201001

ADVISOR
Prof.Dr.Eng. Ir. Imam Robandi, M.T.

**MAGISTER PROGRAM
POWER SYSTEM ENGINEERING
DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2016**

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)

Di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
Irna Tri Yuniahastuti
NRP. 2214201001

Tanggal ujian: 24 Juni 2016
Periode Wisuda : September 2016

Disetujui oleh:

1. Prof. Dr. Eng. Ir. Imam Robandi, M.T (Pembimbing)
NIP. 196308171990031001
2. Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D (Penguji)
NIP. 196510121990031003
3. Dr. Ir. Soedibjo, M.MT. (Penguji)
NIP. 195512071980031004
4. Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D. (Penguji)
NIP. 197311192000031001
5. Dr. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc (Penguji)
NIP. 197007121998021001



PENALAAN OPTIMAL *POWER SYSTEM STABILIZER* (PSS) MENGUNAKAN BAT ALGORITHM (BA) PADA SISTEM KELISTRIKAN 500 KV JAWA-BALI

Nama Mahasiswa : Irna Tri Y
NRP : 2214201001
Pembimbing : Prof. Dr. Eng. Ir. Imam Robandi, M.T

ABSTRAK

PSS harus ditala dengan tepat untuk mendapatkan hasil yang baik. Pada penelitian ini dilakukan simulasi penalaan parameter PSS dengan menggunakan metode yang diusulkan yaitu *Bat Algorithm* (BA) untuk mendapatkan hasil kinerja yang optimal dalam memperbaiki osilasi pada sistem, mempercepat *settling time* dan meredam *overshoot* terhadap respon perubahan frekuensi. *Bat algorithm* adalah salah satu metode cerdas yang mengadopsi kebiasaan kelelawar yaitu ekolokasi. BA digunakan untuk mentala parameter PSS antara lain K_{pss} , T_w , T_1 , T_2 , T_3 dan T_4 .

Dalam penelitian ini sistem diberikan perubahan beban sebesar 0.01 pu pada pembangkit Suralaya. PSS dipasang pada pembangkit terbesar yaitu Suralaya. Hasil penelitian ini menunjukkan dengan menggunakan metode yang diusulkan mampu mengurangi *overshoot* menjadi 0.00072 pu dan mempercepat *settling time* menjadi 5.1 detik pada pembangkit Suralaya. Serta penambahan perubahan beban pada pembangkit Saguling dapat diredam menjadi 0.00051 dan mempercepat *settling time* kurang dari 3 detik. Pemasangan PSS pada pembangkit Suralaya mampu memperbaiki osilasi dan *overshoot* pada pembangkit Suralaya, Cirata, Saguling, Tanjungjati dan Gresik.

Kata kunci : PSS, *Bat Algorithm* (BA), osilasi, *settling time*, *overshoot*, ekolokasi.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

OPTIMAL TUNING *POWER SYSTEM STABILIZER* (PSS) USING BAT ALGORITHM (BA) AT ELECTRICAL SYSTEM 500 kV OF JAVA-BALI

Student name : Irna Tri Yuniahastuti
NRP : 2214201001
Advisor : Prof. Dr. Eng. Ir. Imam Robandi, M.T

ABSTRACT

To Tune PSS must be accurate to get good result. One of additional equipment is used to damp the oscillation is power system stabilizer (PSS). In this research, be simulated using proposed method is Bat Algorithm (BA) for tuning parameter PSS to get optimal performance to improving the oscillation system, accelerate the settling time and reduce overshoot the response of change the load.

Simulation given change of load 0.01 pu and 0.05 pu at Suralaya plant. Bat Algorithm is one method that adopt smart habits of bats namely echolocation. the artificial intelligence will tune parameter PSS, K_{pss} , T_w , T_1 , T_2 , T_3 and T_4 . The result of the study demonstrated that using proposed method can reduce the overshoot to 0.00072 pu and accelerate the settling time to 5.1 second at Suralaya plant. And the addition of load changes in the plant can be muted Saguling be 0.00051 and accelerate the settling time of less than 3 seconds. Installation of PSS in Suralaya plant capable of improving oscillation and overshoot on Suralaya plant, Cirata, Saguling, Tanjungjati and Gresik

Keywords : PSS, *Bat Algorithm (BA)*, *oscillation*, *settling time*, *overshoot*, *echolocation*

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb

Alhamdulillah puji syukur kehadirat Allah SWT karena atas ijin, kuasa dan hidayahNya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul:

**“Penalaan Optimal Power System Stabilizer Menggunakan Bat
Algorithm (BA) Pada Sistem Kelistrikan 500 kV Jawa-Bali”**

Penyusunan tesis ini merupakan syarat bagi penulis untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Bidang Keahlian Teknik Sistem Tenaga, Prodi Teknik Elektro, Program Pascasarjana, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS).

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tesis ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu penulis menerima kritik dan saran untuk perbaikan tesis ini. Semoga buku tesis ini memberikan manfaat kepada mahasiswa teknik elektro dan semua pihak khususnya dibidang kestabilan sistem tenaga listrik.

Akhir kata, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, bapak Suparno dan Ibu Titik Irianti. Kakak tercinta Mas Yoyok, Mbak Tyas dan Mas Chandra serta ponakan-ponakanku NeReBim dan Ghalibie yang selalu mendoakan dan memberi motivasi selama penulis mengikuti proses perkuliahan dan mengerjakan tesis ini
2. Prof. Imam Robandi, selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan kritik serta saran selama bimbingan dan memberikan motivasi selama mengikuti proses perkuliahan
3. Dr. I Made Yulistya Negara, ST, M.Sc, selaku dosen wali dan seluruh pengajar Magister Teknik Elektro Bidang Keahlian Teknik Sistem Tenaga yang telah ikhlas membagikan ilmu serta pengalaman di bidang kelistrikan
4. Teman-teman seperjuangan S2 angkatan tahun 2014 seperti, Budi Amri, Pak Budi, Pak Deny, Irwan, Nesya, Praseto, Yuli, Abdi, Maya, Multazam, Sahriar, Alm. Pak Bambang.
5. Seluruh member PSOC baik S1, S2 seperti mas Tomo, mas Wandu, mas Herlambang, pak Otong dan bapak-bapak S3 yang telah membantu dalam menyelesaikan tesis ini.

6. Teman-teman kost 97, mbak Ika, Mutya, Mei yang telah menemani penulis selama di Surabaya. Dan seseorang yang selalu kurepoti dan selalu memberikan *support* nya.

Semoga tesis ini dapat bermanfaat dan semoga Allah SWT membalas semua pihak yang membantu terselesainya tesis ini.

Surabaya, Juni 2016

Irna Tri Y

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	II
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....	III
ABSTRAK.....	V
ABSTRACT.....	VII
KATA PENGANTAR.....	IX
DAFTAR ISI.....	XI
DAFTAR GAMBAR.....	XIII
DAFTAR TABEL.....	XV
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN	XVII
BAB 1	1
BAB 2.....	3
2.1 Penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya	3
2.2 Kestabilan sistem tenaga listrik	4
2.2.1 Kestabilan steady state	5
2.2.2 Kestabilan transient	5
2.2.3 Kestabilan dinamik	5
2.3 Pemodelan Sistem Tenaga Listrik	7
2.4 Pemodelan Sistem Eksitasi	12
2.5 Pemodelan governor	12
2.6 Power system stabilizer (PSS)	13
2.7 Pemodelan Power System Stabilizer	14
2.7.1 Blok gain	16
2.7.2 Blok Washout	16
2.7.3 Blok Lead-Lag	16
2.7.4 Limiter	16
2.8 Reduksi Matriks Admitansi Jaring	17
2.9 Konversi koordinat mesin ke referensi sistem	19
2.10 Stability	21
2.11 Controllability dan Observability	22

2.12 Bat Algorithm (BA)	23
2.12.1 Perilaku kelelawar	23
2.12.2 Gerakan kelelawar	24
2.12.3 Kebisingan yang dipancarkan	25
2.12.4 Pseudo code BA	25
BAB 3	29
3.1 Diagram alir penelitian	29
3.2 Algoritma Bat Algorithm (BA)	30
BAB 4	33
4.1 Data	33
4.2 Perangkat penunjang	37
4.2.1 Studi aliran daya	37
4.2.2 Pemodelan sistem	37
4.2.3 Reduksi matriks jaring	38
4.3 Hasil simulasi dan analisis	38
4.3.1. Hasil simulasi	39
4.3.2. Analisis	46
BAB 5	49
5.1 Kesimpulan	49
5.2 Saran	49
DAFTAR PUSTAKA	51
BIOGRAFI PENULIS	53
ADDENDUM	55
INDEKS	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Fishbone penelitian mengenai PSS.....	4
Gambar 2. 2 Kurva hubungan sudut deviasi rotor (δ) dan Daya (P)	6
Gambar 2. 3 Representasi mesin sinkron.....	8
Gambar 2. 4 Sistem Eksitasi Fast Exciter	12
Gambar 2. 5 Blok diagram governor	12
Gambar 2. 6 Sistem Dua Area.....	14
Gambar 2. 7 Blok Diagram Mesin PSS dan AVR.....	15
Gambar 2. 8 Blok Diagram PSS.....	15
Gambar 2. 9 Nilai Tegangan V_i Dalam Referensi Dua Frame	20
Gambar 2. 10 Diagram alur pemasangan kontrol.....	23
Gambar 2. 11 Flowchart Bat Algorithm	27
Gambar 3. 1 Diagram alur penelitian.....	29
Gambar 3. 2 Flowchart Bat Algorithm	30
Gambar 3. 3 Flowchart penelitian dengan Bat Algorithm	31
Gambar 4. 1 Single line diagram sistem transmisi Jawa Bali 500 kV.....	34
Gambar 4. 2 Respon kecepatan generator Suralaya pada perubahan beban 0,01 pu	39
Gambar 4. 3 Respon kecepatan generator Muaratawar pada perubahan beban 0,01 pu	40
Gambar 4. 4 Respon kecepatan generator Cirata pada perubahan beban 0,01 pu.....	40
Gambar 4. 5 Respon kecepatan generator Saguling pada perubahan beban 0,01 pu	40
Gambar 4. 6 Respon kecepatan generator Tanjungjati pada perubahan beban 0,01 pu	41
Gambar 4. 7 Respon kecepatan generator Gresik pada perubahan beban 0,01 pu.....	41
Gambar 4. 8 Respon kecepatan generator Paiton pada perubahan beban 0,01 pu	41
Gambar 4. 9 Respon kecepatan generator Grati pada perubahan beban 0,01 pu.....	42
Gambar 4. 10 Respon kecepatan generator Suralaya pada penambahan beban di Saguling	43
Gambar 4. 11 Respon kecepatan generator Muaratawar pada penambahan beban di Saguling	43

Gambar 4. 12 Respon kecepatan generator Cirata pada penambahan beban di Saguling	43
Gambar 4. 13 Respon kecepatan generator Saguling pada penambahan beban di Saguling	44
Gambar 4. 14 Respon kecepatan generator Tanjungjati pada penambahan beban di Saguling	44
Gambar 4. 15 Respon kecepatan generator Gresik pada penambahan beban di Saguling	44
Gambar 4. 16 Respon kecepatan generator Paiton pada penambahan beban di Saguling	45
Gambar 4. 17 Respon kecepatan generator Grati pada penambahan beban di Saguling	45

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Parameter Dinamik Mesin	33
Tabel 4. 2 Parameter Dinamik Mesin (Lanjutan)	34
Tabel 4. 3 Data saluran transmisi	35
Tabel 4. 4 Data Beban dan Pembangkitan	35
Tabel 4. 5 Hasil load flow Magnitude tegangan dan sudut	36
Tabel 4. 6 Data Parameter BA	38
Tabel 4. 7 Batasan parameter PSS	39
Tabel 4. 8 Parameter PSS parameter	39
Tabel 4. 9 parameter PSS penambahan beban pada pembangkit Saguling	42
Tabel 4. 10 Perbandingan overshoot pada masing-masing pembangkit pada penambahan beban 0.01 pu di Suralaya	46
Tabel 4. 11 Perbandingan settling time pada masing-masing pembangkit	47
Tabel 4. 12 Perbandingan eigenvalue pada mode osilasi interarea dan lokal	47

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

BA	= <i>Bat Algorithm</i>
$ITAE$	= <i>integral time absolute error</i>
PSS	= <i>power system stabilizer</i>
AVR	= <i>automatic voltage regulation</i>
AI	= <i>artificial intelligence</i>
$CPSO$	= <i>craziness particle swarm optimizatition</i>
ACO	= <i>ant colony optimization</i>
$DIPSS$	= <i>dual input power system satbilizer</i>
$SMIB$	= <i>single machine infinite bus</i>
GA	= <i>genetic algorithm</i>
P_m	= <i>daya mekanik</i>
P_e	= <i>daya elektrik</i>
T_m	= <i>torsi mekanik</i>
GSC	= <i>governor speed changer</i>
CDI	= <i>comprehensive damping index</i>
ζ_i	= <i>damping ratio</i>
ζ_{min}	= <i>damping minimum</i>
$Fitness$	= <i>nilai kualitas F</i>
$f(x)$	= <i>fungsi objektif, dengan $x \in R^n$</i>
V_d	= <i>tegangan stator sumbu d</i>
V_F	= <i>tegangan medan rotor</i>
V_D	= <i>tegangan kumparan D rotor</i>
V_q	= <i>tegangan stator sumbu q</i>
V_Q	= <i>tegangan kumparan Q rotor</i>
K	= $\sqrt{3}/2$
M_Q	= <i>induktansi mutual antara stator dan kumparan Q rotor</i>
M_D	= <i>induktansi mutual antara stator dan kumparan D rotor</i>
M_F	= <i>induktansi mutual antara stator dan kumparan F rotor</i>
M_R	= <i>induktansi mutual antara stator dan kumparan R dan D</i>

L_d	= induktansi kumparan equivalen sumbu d
L_F	= induktansi rotor (kumparan medan)
L_D	= induktansi rotor (kumparan redaman D)
L_q	= induktansi kumparan equivalen sumbu q
L_Q	= induktansi rotor (kumparan redaman Q)
ω	= kecepatan rotor
δ	= sudut daya
D	= konstanta redaman mesin
r	= tahanan stator
r_F	= tahanan medan rotor
r_D	= tahanan kumparan D rotor
r_Q	= tahanan kumparan Q rotor
i_d	= arus stator sumbu d
i_F	= arus medan rotor
i_D	= arus kumparan D rotor
i_q	= arus stator sumbu q
i_Q	= arus kumparan Q rotor
A	= matriks sistem ($n \times n$)
B	= matriks input ($n \times r$)
C	= matriks pengukuran ($m \times n$)
D	= matriks input untuk output ($m \times r$)
K_A	= gain AVR
T_A	= time konstan AVR
V_t	= tegangan terminal
E_{fd}	= tegangan exciter
T_w	= waktu konstan PSS
K_{PSS}	= gain PSS
K_g	= konstanta gain governor = $1/R$
R	= konstanta speed droop
T_g	= governor time konstan

ADDENDUM

Paper yang telah di Submit

1. Load Frequency Control (LFC) of Microhydro Power Plant with Capacitive Energy Storage (CES) using Bat Algorithm (BA). International conference iSemantic 2016, Semarang

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

INDEKS

- Admitansi**, 30, 31, 32, 49, 50
- Algoritma**, 13, 37, 38, 40, 43, 44, 46, 49
- BA**, i,iii, iv, v, vi, vii, ix, x, 13, 15, 37, 40, 42, 43, 44, 46, 50, 51, 52, 59, 60, 61, 64, 66, 70
- CDI**, x, 36
- Dimensi**, 23, 38
- Dinamik**, vi, 12, 15, 17, 18, 19, 20, 22, 27, 46, 66
- Eigenvalue**, ix, 26, 35, 36, 61
- Ekolokasi**, Iv, 13, 37, 38
- Eksitasi**, 12, 13, 18, 25, 28, 29
- Exciter**, 27
- Frekuensi**, iv, 15, 17, 20, 27, 28, 29, 37, 38, 39, 40, 50
- Gain**, 26, 29
- Generator**, iv, v, viii, ix, 12, 13, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 27, 29, 30, 31, 33, 46, 50, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61
- Governor**, vi, viii, x, xi, 13, 18, 25, 26
- Iterasi**, 38, 39, 40, 52
- Kebisingan**, vi, 39, 51
- Kecepatan**, viii, ix, xi, 17, 25, 28, 29, 30, 38, 40, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59
- Konstanta**, xi, 21, 25, 27
- Kontrol**, viii, 13, 15, 30, 35, 36, 37, 39, 60, 64, 66
- Konvensional**, 15, 52, 59, 60, 61
- Lead-Lag**, vi, 29
- Limiter**, 29, 30
- Linearisasi**, 20, 22, 23
- Lokal Area**, 60, 61
- Matriks**, vi, 30, 33, 35, 50
- Microbat**, 37
- Multimesin**, 16, 42, 46, 50, 67
- Osilasi**, iv, ix, 12, 13, 17, 27, 28, 35, 59, 60, 61
- Overshoot**, iv, v, ix, 15, 16, 43, 59, 60, 61, 64
- Penalaan**, iv, 13, 15, 39, 46, 52
- Posisi**, 38, 40
- Prime Mover**, 17, 18
- PSS**, i, iii, iv, v, vi, viii, ix, x, xi, 13, 15, 16, 26, 27, 28, 29, 30, 44, 46, 50, 51, 52, 59, 60, 61, 64, 66, 67
- Respon**, iv, 15, 17, 18, 25, 28, 29, 44, 46, 50, 52, 59
- Rotor**, viii, x, xi, 17, 19, 20, 21, 23, 25, 28, 29, 30, 34, 52, 59
- Settling Time**, iv, v, ix, 43, 59, 60, 61, 64
- Simulasi**, iv, vii, 39, 42, 46, 50, 52, 60, 64
- Simulink**, 46, 49, 50

Sinkron, viii, 17, 20, 21, 22, 23, 24,
27

Sinkronisasi, iv, 12, 16, 17, 18

State Space, 23

Steady State, vi, 12, 17, 18, 19, 29,
60

Sudut Rotor, 15, 18, 24, 26

Tegangan, ix, x, xi, 12, 13, 17, 18,
19, 20, 26, 28, 29, 30, 31, 33, 34,
46, 50, 51

Transient, vi, 12, 17, 18, 19, 20, 29,
30, 33, 64

Washout, vi, 29

BAB 1

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik setiap tahun terus meningkat seiring perkembangan perkonomian dan perkembangan penduduk. Perubahan beban dan permintaan energi listrik yang terus meningkat harus diikuti dengan kualitas dari sumber tenaga listrik. Ketika terjadi perubahan kondisi antara permintaan dan penyaluran daya hal ini ditandai dengan muncul osilasi. Jika sistem berada pada keadaan stabil maka osilasi ini dapat diredam dalam rentang waktu singkat tetapi bila sistem tidak stabil maka osilasi terjadi dalam waktu yang cukup lama dan tidak dapat diredam.

Pada sistem pengaturan, eksitasi memegang peranan penting dalam mengendalikan kestabilan suatu pembangkit karena apabila terjadi fluktuasi beban maka eksitasi sebagai pengendali akan berfungsi mengontrol keluaran arus medan generator seperti tegangan dan faktor daya dengan cara mengatur kembali besaran-besaran input guna untuk mencari keseimbangan baru. Kestabilan dinamik merupakan faktor penting untuk kehandalan sistem tenaga listrik. Ketidakstabilan pada sistem sangat berbahaya karena dapat menyebabkan loss sinkronisasi dan kemudian menyebabkan *blackout*. Gangguan kestabilan terjadi pada seluruh sistem mulai dari pembangkit, saluran transmisi sampai saluran distribusi.

Secara garis besar terdapat dua macam kestabilan sistem yaitu kestabilan *steady state* dan kestabilan *transient*. Kestabilan *steady state* adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi mesin setelah mengalami gangguan kecil. Analisis kestabilan *steady state* menggunakan model linear. Sedangkan kestabilan *transient* adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar seperti sambaran petir maupun putus jaring transmisi. Analisis kestabilan *transient* menggunakan pendekatan non linear [1]. Selain itu menurut [2] kestabilan *steady state* dan kestabilan dinamik adalah sama. Perbedaannya hanya terletak pada masalah pemodelan. Pada kestabilan dinamik, sistem eksitasi turbin dan generator dimodelkan dengan menyediakan variasi fluks pada air gap mesin. Sementara pada kestabilan *steady state* digunakan model generator yang sederhana, u sebagai generator yang dipresentasikan sebagai sumber tegangan konstan [3].

Sistem tenaga listrik dalam skala besar merupakan sistem yang rentan terhadap gangguan. Demikian juga pada sistem interkoneksi Jawa-Bali 500 kV. Jaringan Jawa-Bali merupakan sistem interkoneksi yang menanggung beban besar. Jika terjadi perubahan pada sistem ini maka dapat menyebabkan terjadinya osilasi pada sistem. Sehingga untuk mengatasi osilasi, ditempatkan peralatan pembantu untuk meredam osilasi. Salah satu peralatan yang dipakai adalah *Power System Stabilizer* (PSS) yang dipasang pada AVR. Dengan menggunakan PSS osilasi pada sistem dapat diredam sehingga tidak menyebabkan generator bergeser dari kondisi stabil. Peredaman osilasi pada sistem interkoneksi sangat penting untuk keamanan operasi sistem. Secara umum ada 2 macam kontrol peredaman osilasi pada sistem tenaga: PSS (*Power System Stabilizer*) dan kontrol FACTS (*Flexible AC Transmission System*). Peralatan kontrol pada sistem tenaga listrik mampu bereaksi secara otomatis terhadap penyimpangan. Peralatan kontrol seperti governor, AVR (*Automatic Voltage Regulator*), dan sistem eksitasi menjadi peralatan kontrol yang harus dimiliki oleh sistem tenaga listrik agar kestabilan sistem tenaga listrik dapat dijaga [4]. Namun secara umum PSS banyak digunakan untuk meningkatkan kehandalan dan fungsi dari sistem tenaga selama operasi normal dan abnormal [5].

Sebuah metaheuristik algoritma baru yang dikenal dengan Bat Algorithm (BA) yang mempunyai sifat ekolokasi berdasarkan perilaku kelelawar. BA merupakan algoritma yang terinspirasi dari perilaku kelelawar (*Bat Behaviour*). Algoritma ini diperkenalkan oleh Xin-She Yang [6]. Pada penelitian ini diusulkan penalaan PSS yang optimal untuk sistem Jawa-Bali dengan menggunakan BA. Penalaan parameter yang optimal sangat berpengaruh dalam menstabilkan sistem.

BAB 2

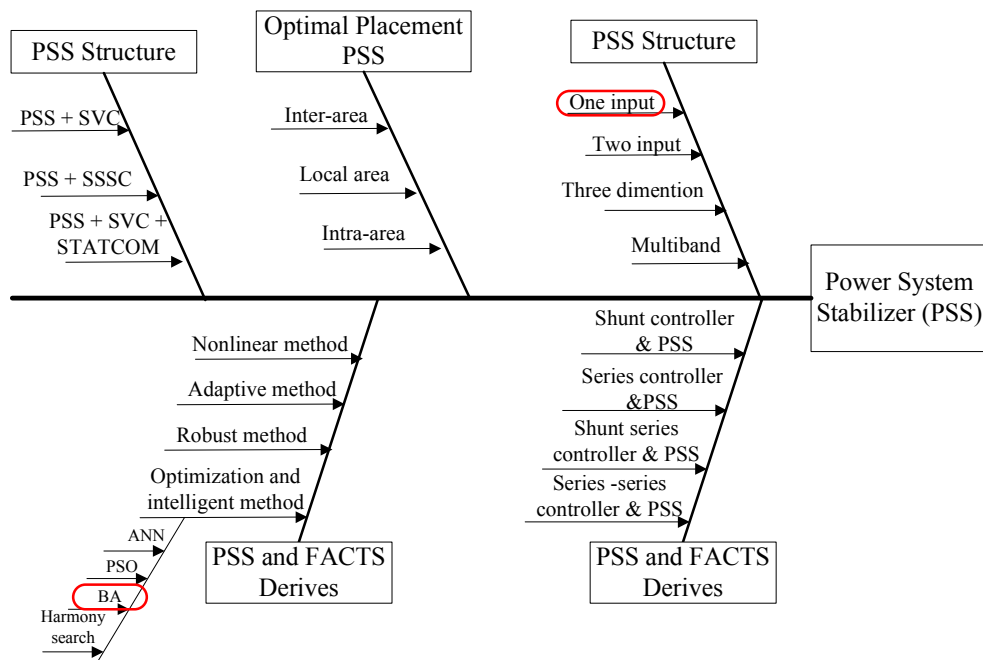
KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya

Beberapa penelitian yang telah dilakukan, antara lain:

- a) Desain adaptive PSS berbasis *Neural Networks* dan *PID controller* menggunakan *Imperialist Competitive Algorithm* (ICA). Hasil yang didapat dengan menggunakan *PID controller* memberikan respon yang lebih baik daripada PSS adaptive konvensional dan PSS konvensional. Penelitian ini dilakukan pada *Single machine* dan *Multimachine*. [7]
- b) Desain kontrol optimal PSS dan FACTS menggunakan *Craziness Particle Swarm Optimization* (CRPSO) pada sistem interkoneksi Jawa-Bali 500 kV [8], didapatkan hasil penalaan dengan menggunakan CRPSO dapat meningkatkan kestabilan sistem lebih baik dibanding dengan menggunakan metode PSO.
- c) Optimisasi *Dual Input Power System Stabilizer* (DIPSS) pada *multimachine Power System Stabilizer* (PSS) menggunakan *Ant Colony Optimization* (ACO) [9], didapatkan hasil respon perubahan frekuensi dengan *overshoot* dan *settling time* yang lebih baik dibanding dengan tanpa DIPSS dan DIPSS. Perubahan sudut rotor juga didapatkan hasil DIPSS-ACO lebih baik dibanding tanpa DIPSS dan DIPSS.
- d) Penalaan *Power System Stabilizer* (PSS) untuk perbaikan stabilitas dinamik pada sistem tenaga listrik menggunakan *Bat Algorithm* (BA) didapatkan hasil penalaan parameter PSS menggunakan BA untuk perbaikan stabilitas dinamik berfungsi untuk mempercepat *settling time* dan meredam *overshoot* respon perubahan frekuensi dan respon perubahan sudut rotor pada sistem tenaga listrik *Single Machine Infinite Bus* (SMIB) [10].
- e) Penalaan PSS menggunakan Bat algorithm lebih mampu meredam overshoot dibandingkan dengan menggunakan Genetic Algorithm (GA) dan Conventional PSS (CPSS) dilakukan pada sistem multimesin. [11].

Road map penelitian mengenai PSS dijelaskan pada gambar 2.1. [12]



Gambar 2. 1 *Fishbone* penelitian mengenai PSS

Berdasarkan penelitian terdahulu sehingga penulis mengajukan judul ‘Penalaan Optimal Power system stabilizer (PSS) menggunakan Bat Algorithm pada sistem kelistrikan Jawa-Bali 500 kV’.

2.2 Kestabilan sistem tenaga listrik

Kestabilan sistem tenaga listrik diartikan dengan kemampuan suatu sistem tenaga listrik atau bagian komponennya untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan jika terjadi gangguan. Selain terganggunya sinkronisasi dan keseimbangan, osilasi menunjukkan kondisi yang tidak stabil pada sistem.

Sistem tenaga listrik yang stabil mempunyai keseimbangan antara daya input mekanis (*prime mover*) dengan daya output elektrik. Dalam keadaan ini generator berputar pada kecepatan sinkron. Apabila terjadi kenaikan atau penurunan beban harus diikuti dengan perubahan daya input mekanis dari *prime mover*. Apabila perubahan ini tidak diikuti oleh perubahan daya mekanis dalam menyesuaikan beban dan rugi-rugi sistem, maka akan terjadi ketidakstabilan. Kecepatan rotor generator (frekuensi sistem) dan tegangan akan menyimpang dari keadaan normal. Sesaat, akan terjadi peredaman besar antara daya input dari prime mover dengan daya output

dari generator, terutama ketika terjadi gangguan. Generator akan mengalami percepatan atau penurunan putaran rotor. Bila tidak segera dihilangkan, maka percepatan atau penurunan rotor generator ini akan menyebabkan hilangnya sinkronisasi sistem.

Kestabilan sistem tenaga dapat dibedakan menjadi tiga kondisi, yaitu kestabilan *steady-state*, *transient* dan dinamik [4].

2.2.1 Kestabilan steady state

Kestabilan mantap (*steady state* atau *small signal stability*) yaitu kemampuan sistem untuk mencapai kondisi stabil yang baru atau identik dengan kondisi stabil sebelumnya setelah terjadi gangguan, atau kondisi dimana sistem dalam keadaan seimbang, yaitu daya listrik yang dibangkitkan generator harus seimbang dengan daya mekanis yang dihasilkan oleh turbin. Kestabilan ini ditandai dengan terjadinya gangguan berupa perubahan beban yang kecil, pengaturan yang kontinyu, dan pengaturan diskrit yang diberikan secara langsung [2]. Pemodelan sistem dapat dimodelkan secara linier untuk mengamati respon sistem [13].

2.2.2 Kestabilan transient

Stabilitas peralihan (*transient*) didefinisikan sebagai kemampuan dari sistem tenaga mempertahankan sinkronisasi transfer daya setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak selama beberapa saat yang menyebabkan penurunan nilai tegangan terminal secara signifikan. Gangguan besar ini misalnya putus jaringan, lepasnya beban, dan pengaturan *tap changer* sebelum *governor* bekerja. Gejala *transient* ini dikenali dengan respon sistem berupa amplitudo yang besar dan ketidakseimbangan torsi saat terjadi gangguan [2]. Untuk analisis kestabilan *transient* digunakan pendekatan model non linier

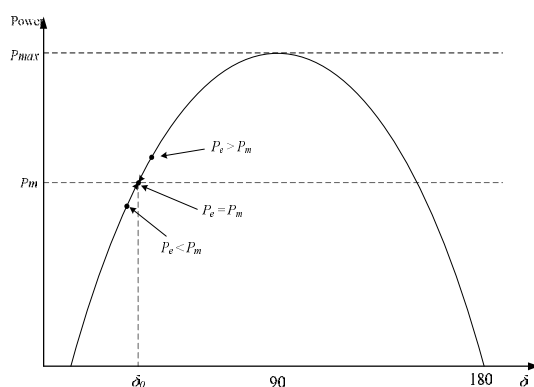
2.2.3 Kestabilan dinamik

Kestabilan dinamik sistem tenaga listrik adalah kestabilan sistem tenaga listrik akibat adanya perubahan beban yang sangat kecil. Kestabilan dinamik ini sama dengan kestabilan *steady-state* namun yang membedakan yaitu sistem eksitasi, turbin, dan generator dimodelkan dengan memperhitungkan variasi medan magnet

pada *air gap* mesin, sedangkan pada kestabilan *steady state* generator direpresentasikan sebagai sumber tegangan yang konstan atau tidak terjadi variasi *flux*. Sumber lain menyebutkan bahwa kestabilan ini berarti kemampuan sistem untuk tetap mempertahankan sinkronisasi setelah *initial swing* atau periode *transient* hingga kondisi titik keseimbangan *steady state* [2].

Dalam kestabilan dinamik *governor* sudah merespon terjadinya gangguan berupa membuka dan menutup untuk memberikan energi pada *prime mover* dan beberapa kontroler jaringan kembali beroperasi dalam keadaan normal. Setelah respon dari *governor* ini sudut rotor akan berosilasi hingga tercapai kondisi stabil sesuai dengan kondisi beban yang baru. Analisis ini penting karena sistem pada umumnya pada ayunan pertama atau *first swing* sudah stabil namun selama periode dinamik terjadi perubahan. Hal ini perlu diperhatikan untuk menghindari sistem menjadi tidak stabil.

Teknik penyelesaian masalah kestabilan transient dan dinamik adalah dengan menyelidiki kestabilan sistem itu terhadap perubahan kecil (*incremental*) di sekitar titik kesetimbangan.



Gambar 2. 2 Kurva hubungan sudut deviasi rotor (δ) dan Daya (P)

Pada Gambar 2.2 hubungan antara sudut deviasi rotor dari titik operasi *steady state* (δ) dan daya (P).

- Bila $P_e > P_m$ ($\delta > \delta_0$) maka rotor akan mengalami perlambatan
- Bila $P_e < P_m$ ($\delta < \delta_0$) maka rotor akan mengalami percepatan

Dari Gambar 2.2 dapat ditulis dalam Persamaan 2.1 sebagai berikut,

$$P_e = \frac{E'_g E_0}{X} \sin \delta_0 \quad (2.1)$$

Dengan,

P_e = Daya aktif yang disalurkan

X = Reaktansi transmisi dari terminal generator sampai *infinite bus*

E'_g = Tegangan internal generator

E_0 = Tegangan *infinite bus*

δ_0 = Sudut antara tegangan internal generator dengan *infinite bus*

Jika terjadi perubahan disisi beban, akan menyebabkan perubahan frekuensi dan tegangan sistem. Hal ini sesuai,

$$P_m - P_e = M \frac{d\omega}{dt} \quad (2.2)$$

bila $P_m > P_e \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} > 0$, sehingga ω akan naik dan f juga naik

bila $P_m < P_e \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} < 0$, sehingga ω akan turun dan f juga turun

bila $P_m = P_e \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} = 0$, sehingga ω akan konstan dan f juga konstan

2.3 Pemodelan Sistem Tenaga Listrik [14]

Dalam menyelesaikan permasalahan terkait dengan stabilitas sistem, diperlukan proses linearisasi besaran dan variabel-variabel yang digunakan sehingga besaran tegangan, arus, dan daya dapat berkaitan langsung terhadap kondisi nyata dari sistem. Terdapat dua macam pemodelan sistem, yaitu pemodelan nonlinear untuk sistem yang akan dianalisis berdasarkan responnya terhadap gangguan *transient* dan pemodelan linier untuk menganalisis pengaruh sistem terhadap gangguan dinamik yang terjadi. Untuk memodelkan generator sinkron dalam persamaan matematis dapat melalui transformasi *Park*. Model tersebut dibuat dengan asumsi sebagai berikut [29], seperti tahanan stator diabaikan, sistem dianggap seimbang dan kejenuhan inti diabaikan, serta beban diasumsi beban statik.

Transformasi Park adalah suatu metode penyederhanaan dalam membentuk suatu deskripsi matematika terhadap sebuah mesin sinkron melalui transformasi terhadap variabel yang digunakan. Melalui transformasi Park besaran pada stator seperti arus, tegangan dan kerapatan fluks ditentukan berdasarkan pada variable

Dari Gambar 2.3 dapat diperoleh Persamaan 2.3 dan Persamaan 2.4,

$$i_{daxis} = \left(\frac{2}{3}\right) \left[i_a \cos \theta + i_b \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.4)$$

$$i_{0da} = P i_{abc} \quad (2.5)$$

8

$$i_{0dq} = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \text{ dan } i_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Besaran P merupakan konstanta yang dinyatakan dalam persamaan 2.7

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Untuk memperoleh model linier dari mesin sinkron, terlebih dahulu dibentuk persamaan nonlinier yang terdapat pada mesin sinkron. Terdapat dua macam model persamaan nonlinier pada mesin sinkron yaitu perkalian nonlinier dan fungsi trigonometri. Dalam proses melakukan linearisasi pada suatu model kita memerlukan nilai inialisasi awal. Misalkan untuk memodelkan generator digunakan vektor *state space* x maka untuk inialisasi awal kita menggunakan variabel x_0 pada waktu $t=t_0$. Misalkan model arus:

$$x_0^t = [i_{d0} i_{F0} i_{D0} i_{q0} i_{Q0} \omega_0 \delta_0] \quad (2.8)$$

Ketika terjadi gangguan kecil pada $t=t_0^+$ maka titik kerja akan bergeser dari kondisi awal sesuai dengan Persamaan 2.9

$$x = x_0 + x_\Delta \quad (2.9)$$

Nilai dari x_0 tidak harus konstan, tetapi besarnya harus diketahui. Berdasarkan pada model dari *state space* maka dapat dituliskan dalam bentuk Persamaan 2.10,

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (2.10)$$

Dengan mengubah nilai x pada Persamaan 2.10 maka,

$$\dot{x}_0 + \dot{x}_\Delta = f(x_0 + x_\Delta, t) \quad (2.11)$$

Apabila Persamaan 2.11 tersebut dijabarkan, dengan menghilangkan bagian orde kedua yang dianggap bernilai kecil, misalnya nilai $x_{i\Delta}$ $x_{j\Delta}$ yang sangat kecil. Maka,

$$\dot{x}_0 + \dot{x}_\Delta \cong f(x_0, t) + A(x_0)x_\Delta + B(x_0)u \quad (2.12)$$

Kemudian dilakukan linearisasi sehingga menghasilkan Persamaan 2.13.

$$\dot{x}_\Delta = A(x_0)x_\Delta + B(x_0)u \quad (2.13)$$

Nilai dari elemen matriks A bergantung dari nilai awal dari vektor x_0 . Untuk studi dinamik, maka nilai ini dipertimbangkan konstan. Unsur-unsur dinamik sistem digambarkan sesuai dengan Persamaan (2.13) yang dihitung dari eigenvalue natural dari matriks A. State space akan berada dalam suatu n-dimensi. Model linear dari generator sinkron dinyatakan dalam persamaan sumbu d (dalam pu).

$$v_d = -r_i d - \omega L_q i_q - k\omega M_Q i_Q - L_d i_d - kM_F i_F - M_D i_D \quad (2.14)$$

Dengan $r=r_a=r_b=r_c$ adalah tahanan stator, L_d dan L_q adalah induktansi rotor, M_d dan M_q adalah *mutual inductance*. Selanjutnya proses linearisasi dituliskan:

$$(v_{d0} + v_{d\Delta}) = -r(i_{d0} + i_{d\Delta}) - (\omega_0 + \omega_\Delta)L_q(i_{q0} + i_{q\Delta}) - k(\omega_0 + \omega_\Delta)M_Q(i_{Q0} + i_{Q\Delta}) - L_d(i_{d0} + i_{d\Delta}) - kM_F(i_{F0} + i_{F\Delta}) - M_D(i_{D0} + i_{D\Delta}) \quad (2.15)$$

Apabila persamaan diatas diuraikan maka akan terbentuk Persamaan 2.16

$$(v_{d0} + v_{d\Delta}) = (-ri_{d0} - \omega_0 L_q i_{q0} - k\omega_0 M_Q i_{Q0} - L_d i_{d0} - kM_F i_{F0} - kM_D i_{D0}) - ri_{d\Delta} - \omega_0 L_q i_{q\Delta} - i_{q0} L_q \omega_\Delta - \omega_0 kM_Q i_{Q\Delta} - i_{Q0} kM_Q \omega_\Delta - L_d i_{d\Delta} - kM_F i_{F\Delta} - kM_D i_{D\Delta} \quad (2.16)$$

Bagian pada sisi kanan yang dikurung merupakan komponen v_{d0} sedangkan untuk komponen $v_{d\Delta}$ dapat disederhanakan sebagai berikut,

$$v_{d\Delta} = -ri_{d\Delta} - \omega_0 L_q i_{q\Delta} - \omega_0 kM_Q i_{Q\Delta} - (i_{q0} L_q + i_{Q0} kM_Q) \omega_\Delta - L_d i_{d\Delta} - kM_F i_{F\Delta} - kM_D i_{D\Delta} \quad (2.17)$$

Sehingga persamaan 2.17 disederhanakan menjadi,

$$v_{d\Delta} = -ri_{d\Delta} - \omega_0 L_q i_{q\Delta} - \omega_0 kM_Q i_{Q\Delta} - \lambda_{q0} \omega_\Delta - L_d i_{d\Delta} - kM_F i_{F\Delta} - kM_D i_{D\Delta} \quad (2.18)$$

Maka, dapat dilakukan proses linearisasi pada persamaan di sumbu q .

$$v_{q\Delta} = \omega_0 L_d i_{d\Delta} + \omega_0 kM_F i_{F\Delta} + \omega_0 kM_D i_{D\Delta} + (i_{d0} L_d + i_{F0} kM_F + i_{D0} kM_D) \omega_\Delta - ri_{q\Delta} - L_q i_{q\Delta} - kM_Q i_Q \quad (2.19)$$

Sehingga dapat disederhanakan menjadi,

$$v_{q\Delta} = \omega_0 L_d i_{d\Delta} + \omega_0 kM_F i_{F\Delta} + \omega_0 kM_D i_{D\Delta} + \lambda_{d0} \omega_\Delta - ri_{q\Delta} - L_q i_{q\Delta} - kM_Q i_Q \quad (2.20)$$

Linearisasi persamaan medan dan damper winding sebagai berikut,

$$-v_{F\Delta} = -r_F i_{F\Delta} - kM_F i_{d\Delta} - L_F i_{F\Delta} - M_R i_{D\Delta} \quad (2.21)$$

$$0 = -r_D i_{D\Delta} - kM_D i_{d\Delta} - M_R i_{F\Delta} - L_D i_{D\Delta} \quad (2.22)$$

$$0 = -r_Q i_{Q\Delta} - kM_Q i_{q\Delta} - L_Q i_{Q\Delta} \quad (2.23)$$

Linearisasi persamaan torka,

$$\begin{aligned} \tau_j \dot{\omega}_\Delta = & \left(\frac{1}{3} \right) (-L_d i_{q0} i_{d\Delta} - L_d i_{d0} i_{q\Delta} - kM_F i_{q0} i_{F\Delta} - kM_F i_{F0} i_{q\Delta} - kM_D i_{q0} i_{D\Delta} - \\ & kM_D i_{D0} i_{q\Delta} + L_q i_{d0} i_{q\Delta} + L_q i_{q0} i_{d\Delta} + L_q i_{q0} i_{d\Delta} + kM_Q i_{d0} i_{Q\Delta} + kM_Q i_{Q0} i_{d\Delta}) - \\ & D\omega_\Delta + T_{m\Delta} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Dapat juga dituliskan sebagai,

$$\begin{aligned} \tau_j \dot{\omega}_\Delta = & T_{m\Delta} - \left(\frac{1}{3} \right) ((L_d i_{q0} - \lambda_{q0}) i_{d\Delta} + (\lambda_{d0} - L_q i_{d0}) i_{q\Delta} - kM_F i_{q0} i_{F\Delta} - \\ & kM_D i_{q0} i_{D\Delta} + kM_Q i_{d0} i_{Q\Delta}) - D\omega_\Delta \end{aligned} \quad (2.25)$$

Dengan persamaan perubahan sudut rotor generator diberikan pada persamaan (2.26)

$$\dot{\delta}_\Delta = \omega_\Delta \quad (2.26)$$

Persamaan linear generator sinkron diatas ditulis dalam model matriks:

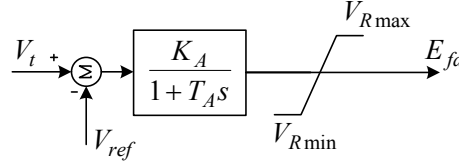
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta v_d \\ -\Delta v_F \\ 0 \\ \Delta v_q \\ 0 \\ \Delta T_m \\ 0 \end{bmatrix} = & - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & \omega_0 L_q & \omega_0 kM_Q & \lambda_{q0} & 0 \\ 0 & r_F & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_0 L_d & -\omega_0 kM_F & -\omega_0 kM_D & r & 0 & -\lambda_{d0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q & 0 & 0 \\ \frac{\lambda_{q0} - L_d i_{q0}}{3} & \frac{-kM_F i_{q0}}{3} & \frac{-kM_D i_{q0}}{3} & \frac{-kM_Q i_{d0}}{3} & \frac{kM_Q i_{d0}}{3} & -D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \\ \Delta \omega \\ \Delta \delta \end{bmatrix} \\ & - \begin{bmatrix} L_d & kM_F & kM_D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ kM_F & L_F & M_R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ kM_D & M_R & L_D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_q & kM_Q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & kM_Q & L_Q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\tau_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{i}_d \\ \Delta \dot{i}_F \\ \Delta \dot{i}_D \\ \Delta \dot{i}_q \\ \Delta \dot{i}_Q \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{\delta} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.27)$$

2.4 Pemodelan Sistem Eksitasi [14] [4]

Sistem eksitasi merupakan peralatan yang berfungsi mengatur besar kecilnya arus medan pada generator. Pada penelitian ini yang digunakan adalah tipe *fast exciter* yang mempunyai respon cepat.

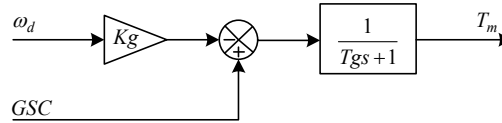
$$E_{fd} = K_A (V_t - V_{ref}) / (1 - T_A s) \quad (2.28)$$

K_A merupakan parameter penguatan dan T_A merupakan nilai konstanta waktu. Nilai output dari exciter dibatasi menggunakan blok saturasi, $V_{Rmin} < E_{fd} < V_{Rmax}$. Model exciter dalam bentuk blok diagram dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Sistem Eksitasi Fast Exciter

2.5 Pemodelan governor [4] [15]



Gambar 2. 5 Blok diagram governor

Besar torka mekanik T_m tergantung pada konstanta *speed drop*, transfer function governor dan sumber energi. Perubahan nilai T_m dihasilkan oleh perubahan kecepatan dan *speed reference* (*Governor Speed Control*). Apabila terjadi putaran rotor generator, maka governor akan memberikan umpan balik untuk memberikan keseimbangan baru. Bentuk dari diagram blok governor dapat dilihat pada Gambar 2.5.

Dalam model ini, diasumsikan nilai GSC adalah nol ($GSC=0$) dan efek penggabungan sistem turbin dengan speed governor menghasilkan daya mekanik P_m yang dapat dirumuskan pada Persamaan 2.29 berikut,

$$P_m = - \left[\frac{K_g}{(1 + T_g s)} \right] \omega_d \quad (2.29)$$

Dengan,

K_g = Konstanta Gain= $1/R$

T_g = Governor time konstan

R = Konstanta droop governor

2.6 Power system stabilizer (PSS) [4]

Berikut ini tinjauan singkat dari konsep dasar tentang kestabilan. Sistem daya secara umum dapat digambarkan sebagai sebuah persamaan aljabar dan persamaan diferensial nonlinear sebagai berikut,

$$d \frac{x}{dt} = \dot{x} = f(x, z) \quad (2.30)$$

$$y = h(x, z) \quad (2.31)$$

$$0 = y(y, z) \quad (2.32)$$

x adalah variabel keadaan, y adalah injeksi daya aktif dan reaktif, dan z adalah besar tegangan dan sudut rotor. Analisis dapat dilakukan dengan melinearkan sistem persamaan di sekitar titik operasi dengan kondisi $x=x(0)$, dan $y=y(0)$, dan $z=z(0)$ yang dinyatakan dengan,

$$x = x(0) + \Delta x \quad (2.33)$$

$$y = y(0) + \Delta y \quad (2.34)$$

$$z = z(0) + \Delta z \quad (2.35)$$

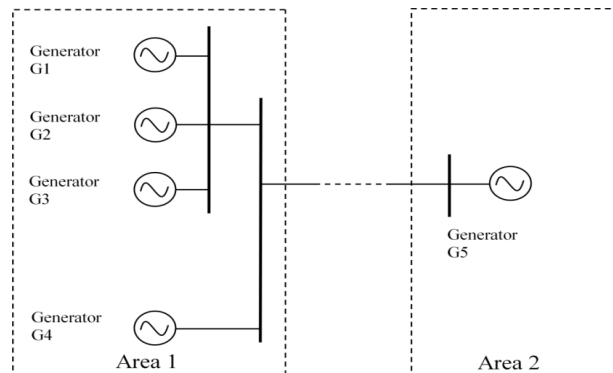
Sehingga diperoleh persamaan state space berikut,

$$\dot{\Delta x} = \mathbf{A} \Delta x \quad (2.36)$$

Δx adalah variabel sistem berdimensi $n \times 1$ dan \mathbf{A} adalah matriks sistem.

Kestabilan titik operasi dapat ditentukan dari lokasi eigenvalue matriks \mathbf{A} . Jika seluruh bagian nyata dari eigenvalue tersebut negatif maka sistem dinyatakan stabil. Jika eigenvalue mempunyai satu atau lebih bagian nyata yang positif, maka sistem dinyatakan tidak stabil. Berikut variasi mode dikelompokkan dalam 3 kategori [4]

- a. Mode Intra-plant bertempat hanya pada sebuah generator dalam sebuah plant yang berpartisipasi. Frekuensi osilasi mode ini, antara 1,5 - 3,0 Hz.
- b. Mode Lokal tempat beberapa generator dalam area tersebut yang berpartisipasi. Frekuensi osilasi pada mode ini adalah antara 0,8 - 1,8 Hz.
- c. Mode Interarea tempat banyak generator dalam area yang luas yang berpartisipasi. Frekuensi osilasi pada mode ini adalah kisaran 0,2 - 0,5 Hz.



Gambar 2. 6 Sistem Dua Area

Area 2 menggambarkan generator tunggal G_5 . Area 1 mempunyai 4 generator G_1 , G_2 , G_3 , dan G_4 . Generator G_1 , G_2 , dan G_3 dihubungkan secara paralel dan berpartisipasi dalam osilator intra-plant yang mempunyai frekuensi lebih tinggi, dan hasil reaksi lebih rendah diantara 3 mesin dan juga inersi yang lebih kecil. Ketidakstabilan timbul pada torque redaman negatif yang disebabkan oleh *exciter* aksi cepat di bawah kondisi operasi konstanta $K_5 < 0$ (berharga negatif). Oleh sebab hal itu, tujuan pemasangan PSS di sini adalah memberikan torque redaman tambahan tanpa mempengaruhi torque sinkron.

2.7 Pemodelan Power System Stabilizer [13] [4]

PSS banyak digunakan dalam sistem tenaga listrik untuk memperbaiki kestabilan dinamik, PSS digunakan sebagai kontroler sistem eksitasi untuk menambah redaman pada osilasi rotor. Untuk menghasilkan komponen redaman PSS memproduksi komponen torsi elektris yang sesuai dengan deviasi pada kecepatan rotor. PSS harus ditala dengan tepat, untuk membantu *exciter* dalam meredam osilasi dapat digambarkan dalam Gambar 2.7.

PSS menerima input berupa perubahan kecepatan rotor untuk menghasilkan sinyal tambahan sebagai kontroler *exciter*. *Exciter* mempengaruhi besar tegangan medan yang dihasilkan pada sisi rotor dan mempengaruhi besar fluks magnetik yang dibangkitkan. Fluks magnetik berbanding lurus dengan besar torka elektris yang dihasilkan pada mesin. Torka elektris melawan besar torka mekanik untuk meredam osilasi frekuensi yang terjadi pada mesin. [13]

2.7.2 Blok Washout

Washout filter berfungsi untuk menyediakan bias *steady state* output PSS yang akan memodifikasi tegangan terminal generator. PSS diharapkan hanya dapat merespon variasi *transient* dari sinyal kecepatan rotor generator dan tidak untuk sinyal DC offset. *Wash out filter* bekerja sebagai *high pass filter* yang akan melewatkan semua frekuensi yang diinginkan. Apabila hanya mode lokal yang diinginkan, nilai T_w dapat dipilih dalam range 1 sampai 2. Tetapi, jika mode interarea juga ingin diredam, maka nilai T_w harus dipilih dalam interval 10 sampai 20. Nilai T_w yang lebih tinggi dapat memperbaiki respon tegangan sistem selama *island operation*.

2.7.3 Blok Lead-Lag

Lead-Lag berfungsi sebagai penghasil karakteristik *phase-lead* yang sesuai untuk mengkompensasi *phase-lag* antara masukan eksitasi dan torsi generator

2.7.4 Limiter

Output PSS dibatasi agar aksi PSS pada AVR sesuai dengan yang diharapkan. Sebagai contoh, pada saat terjadi pelepasan beban, AVR beraksi untuk mengurangi tegangan terminal generator pada saat PSS menghasilkan sinyal kontrol untuk menaikkan tegangan (karena kecepatan rotor generator bertambah besar pada saat terjadi pelepasan beban). Pada kondisi ini sangat diperlukan untuk menonaktifkan PSS. Hal ini menunjukkan pentingnya pembatasan nilai sinyal output PSS yang dapat dilakukan oleh blok limiter. Perlu diperhatikan bahwa, nilai Batasan negatif yang tinggi dapat mengganggu kestabilan swing yang pertama

2.8 Reduksi Matriks Admitansi Jaring [14]

Reduksi matriks admitansi jaring adalah metode yang digunakan untuk mereduksi bus-bus selain bus generator. Metode tersebut dapat memudahkan dalam analisis sistem tenaga listrik dan dapat mengetahui hubungan antar generator. Untuk mempelajari reduksi jaring, diasumsikan bahwa jaring transmisi memiliki $n+m$ bus. Variabel n adalah jumlah bus generator dan m adalah jumlah bus non generator. Sehingga matriks Y_{BUS} sistem tenaga.

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} y_{1,1} & \cdots & y_{1,n+m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n+m,1} & \cdots & y_{n+m,n+m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & m \\ Y_1 & Y_3 \\ Y_2 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ m \end{matrix} \quad (2.38)$$

Jika masing-masing generator direpresentasikan sebagai sumber tegangan $E_i = |E_i| \angle \delta_i$ yang seri dengan reaktansi *transient* x_d' , maka x_d' dapat direpresentasikan sebagai admintansi y_i . Representasi ini dapat dilihat pada Gambar 2.9. Node bagian dalam generator diberi notasi 1, 2, ..., n dan nomor bus jaring sistem tenaga listrik diberi notasi $n+1$, ..., $2n+m$, sehingga matriks admitansi jaring,

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} n & n & m \\ Y & -Y & 0 \\ -Y & Y_1 + Y & Y_2 \\ 0 & Y_3 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ n \\ m \end{matrix} \quad (2.39)$$

Beban direpresentasikan sebagai admitansi konstan pada bus dengan notasi $(n+1)$, ..., $(2n+m)$. Nilai admitansi dari representasi beban dirumuskan,

$$Y_{Li} = \frac{P_{Li} - jQ_{Li}}{|V_i|^2}, \quad i = n+1, \dots, 2n+m \quad (2.40)$$

$|V_i|$ adalah magnitude dari phasor tegangan pada bus ke- i dan $P_{Li} + jQ_{Li}$ adalah beban pada bus ke- i . Sehingga, keseluruhan matriks Y_{BUS} dapat dituliskan,

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} n & n & m \\ Y & -Y & 0 \\ -Y & Y_1 + Y + Y_{Lg} & Y_2 \\ 0 & Y_3 & Y_4 + Y_{L\ell} \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ n \\ m \end{matrix} \quad (2.41)$$

Dengan matriks admitansi beban dituliskan sebagai berikut.

$$Diag(Y_{Li}) = \begin{bmatrix} n & m \\ Y_{Lg} & 0 \\ 0 & Y_{L\ell} \end{bmatrix} \begin{matrix} n, \quad i = n+1, \dots, 2n+m \\ m \end{matrix} \quad (2.42)$$

Y_{Lg} adalah admitansi beban pada bus generator dan Y_{Li} adalah admitansi beban pada bus beban. Sehingga, hubungan tegangan jangkar generator E dengan arus,

$$I = Y_{BUS} E \quad (2.43)$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_n \\ i_{n+1} \\ \vdots \\ i_{2n+m} \end{bmatrix} = Y_{BUS} \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_n \\ E_{n+1} \\ \vdots \\ E_{2n+m} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Nilai i yang masuk pada bus beban bernilai nol, sehingga :

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_n \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = Y_{BUS} \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_n \\ E_{n+1} \\ \vdots \\ E_{2n+m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_A & Y_B \\ Y_C & Y_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_n \\ E_{n+1} \\ \vdots \\ E_{2n+m} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} Y_A & Y_B \\ Y_C & Y_D \end{bmatrix} \begin{matrix} n & n+m \\ n & n+m \end{matrix} \quad (2.46)$$

Dengan, Y_A berukuran $n \times n$, Y_B berukuran $n \times (n+m)$, Y_C berukuran $(n+m) \times n$ dan Y_D berukuran $(n+m) \times (n+m)$. Dari Persamaan (2.45) dan (2.46), persamaan matriks admitansi jaring dapat dituliskan dalam bentuk Persamaan :

$$\begin{bmatrix} I_A \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_A & Y_B \\ Y_C & Y_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_A \\ E_D \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

$$I_A = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} \quad E_A = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \quad E_D = \begin{bmatrix} E_{n+1} \\ E_{n+2} \\ \vdots \\ E_{2n+m} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Sehingga,

$$I_A = Y_A E_A + Y_B E_D \quad (2.49)$$

$$0 = Y_C E_A + Y_D E_D \quad (2.50)$$

$$E_D = -Y_D^{-1} Y_C E_A \quad (2.51)$$

Dengan mensubstitusikan maka diperoleh,

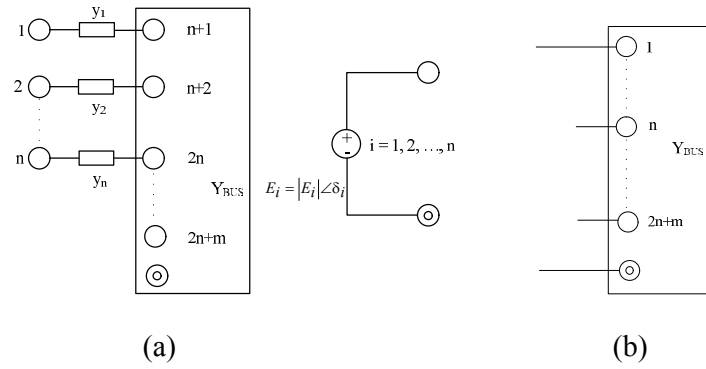
$$I_A = Y_A E_A + Y_B (-Y_D^{-1} Y_C E_A) \quad (2.52)$$

$$I_A = [Y_A - Y_B Y_D^{-1} Y_C] E_A \quad (2.53)$$

Untuk $I_A = [Y_{red}] E_A$, maka

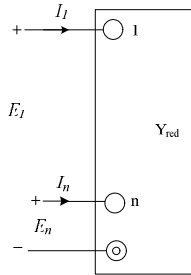
$$Y_{red} = [Y_A - Y_B Y_D^{-1} Y_C] \quad (2.54)$$

Dengan mereduksi matriks Y_{bus} menjadi matriks Y_{red} , topologi jaring yang sebenarnya tidak tampak. Tetapi, analisis sistem tenaga menjadi lebih sederhana.



Gambar 2.9 (a) Matriks Y_{BUS} , (b) Modifikasi Y_{BUS}

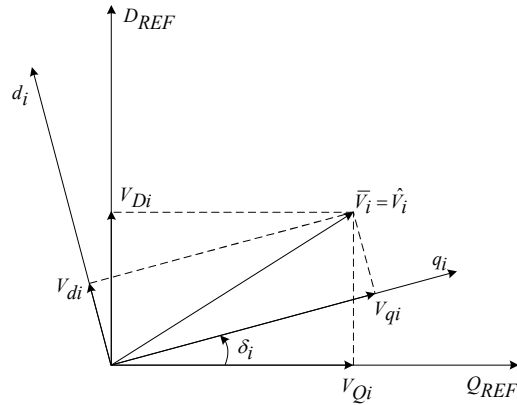
Dari sistem transmisi dan representasi generator dengan internal node 1, 2, ..., n . Dengan beban direpresentasikan sebagai impedansi konstan dan rektansi *transient* generator masuk ke dalam y_{bus} (Persamaan 2.54).



Gambar 2.10 Matriks Y_{red}

2.9 Konversi koordinat mesin ke referensi sistem [14]

Dalam model $D-Q$, dikenal dua istilah, yaitu referensi mesin yang ditulis dengan notasi $d-q$ kecil dan referensi sistem yang dinotasikan dengan $D-Q$ besar. Untuk memahami dan mengkonversi dua referensi yang berbeda ini, diberikan Gambar 2.12 untuk memudahkan dalam pemaparan



Gambar 2. 9 Nilai Tegangan V_i Dalam Referensi Dua Frame

Gambar 2.9 dapat dirumuskan suatu hubungan antara tegangan pada referensi mesin dan tegangan pada referensi jaring dalam Persamaan 2.58.

$$v_{Qi} + jv_{Di} = (v_{qi} \cos \delta_i - v_{di} \sin \delta_i) + j(v_{qi} \sin \delta_i + v_{di} \cos \delta_i) \quad (2.55)$$

$$\hat{v}_i = \hat{v}_i e^{j\delta_i} \quad (2.56)$$

Beberapa besaran sistem tenaga listrik dalam koordinat a , b , dan c , misal tegangan pada titik i adalah \mathbf{v}_{abci} . Dengan menggunakan Transformasi Park, koordinat \mathbf{v}_{abci} dapat diubah ke dalam koordinat \mathbf{v}_{dqi} . Tegangan dalam koordinat $d-q$ dapat dinotasikan dalam phasor \bar{V}_i , dengan rotor mesin ke- i sebagai referensi. Referensi rotor mesin ke- i dapat dinyatakan dalam referensi sistem $D-Q$ (dengan notasi tegangan \hat{V}_i) menggunakan persamaan 2.56. Persamaan tersebut digunakan untuk mengubah besaran-besaran yang semula dalam referensi rotor mesin ke- i ke dalam satu referensi sistem yang sama. Persamaan 2.56 dapat diperluas untuk setiap titik melalui Persamaan 2.57 berikut.

$$T = \begin{bmatrix} e^{j\delta_i} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{j\delta_i} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & e^{j\delta_i} \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

$$\hat{V} = \begin{bmatrix} V_{Q1} + jV_{D1} \\ V_{Q2} + jV_{D2} \\ \vdots \\ V_{Qn} + jV_{Dn} \end{bmatrix}, \quad \bar{V} = \begin{bmatrix} V_{q1} + jV_{d1} \\ V_{q2} + jV_{d2} \\ \vdots \\ V_{qn} + jV_{dn} \end{bmatrix}$$

Sehingga,

$$\hat{v}_i = T\hat{V}_i \quad (2.59)$$

Untuk $T^{-1} = T^*$ maka

$$\hat{V}_i = T\ddot{V}_i \quad (2.60)$$

Dengan cara yang sama, konversi untuk besaran arus sebagai berikut,

$$\ddot{I} = T\bar{I} \text{ dan } I = T\hat{I} \quad (2.61)$$

2.10 Stability [4] [13]

Kestabilan dianalisis menggunakan beberapa cara, yaitu analisis *eigenvalue*, analisis Routh Hurwith dan lain-lain. Untuk analisis tersebut, diperlukan model matematik dari sistem yang dianalisis. Dari model matematik yang diperoleh diubah ke dalam bentuk persamaan matriks keadaan, seperti pada Persamaan 2.62 dan 2.63.

Dengan,

Δx = Matriks keadaan ($n \times 1$)

Δy = Matriks variabel output ($m \times 1$)

u = Matriks variabel input ($r \times 1$)

A = Matriks sistem ($n \times n$)

B = Matriks input ($n \times r$)

C = Matriks pengukuran ($m \times n$)

D = Matriks input untuk output ($m \times r$)

Melalui matriks sistem A , kondisi kestabilan sistem dapat dipantau :

$$\text{Det}(sI - A) = 0 \quad (2.62)$$

Dengan I adalah matriks identitas dan s adalah *eigenvalue* dari matriks A .

Matriks A berukuran $n \times n$, sehingga banyaknya *eigenvalue* yang diperoleh sebanyak n , $\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$.

$$\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i \quad (2.63)$$

Frekuensi osilasi dalam Hz adalah

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.64)$$

Dengan,

λ_i = *Eigenvalue* ke- i

σ_i = Komponen riil dari *eigenvalue* ke- i

ω_i = Komponen imajiner dari *eigenvalue* ke-*i*

Berdasarkan nilai *eigenvalue* matriks A, kestabilan sistem dapat diketahui. Sistem dikatakan stabil jika bagian real dari *eigenvalue* bernilai negatif. Pengecekan kestabilan ini sangat penting dilakukan pada saat memasang peralatan kontrol pada suatu sistem. Dengan kata lain, sebelum memberikan kontrol pada suatu sistem, sistem yang akan dikontrol harus stabil. Setelah stabil, baru dipasang kontrol. Bagian riil *eigenvalue* merupakan komponen redaman, sedangkan bagian imajiner merupakan komponen osilasi. Nilai redaman dapat diketahui menggunakan nilai *damping ratio* (Persamaan 2.67). Sedangkan redaman sistem secara keseluruhan dapat diketahui dari nilai *Comprehensive Damping Index* (CDI) yang dirumuskan pada Persamaan 2.68 [15]

$$\zeta_i = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (2.65)$$

$$CDI = \sum_{i=1}^n (1 - \zeta_i) \quad (2.66)$$

Dengan,

ζ_i = *Damping ratio* ke-*i*

n = jumlah *eigenvalue*

2.11 Controllability dan Observability [4]

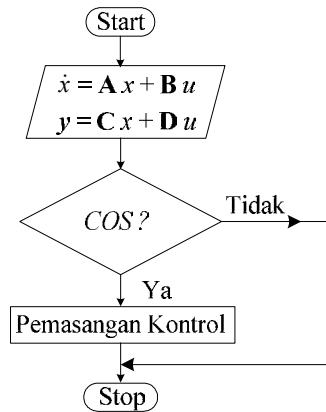
Sebelum melakukan langkah kontrol pada suatu sistem, penting untuk diketahui terlebih dahulu apakah sistem tersebut dapat dikontrol atau tidak. Apabila sistem telah memenuhi syarat *controllability* artinya sistem tersebut dapat dikontrol. Apabila sistem dinyatakan sesuai dengan Persamaan 2.62 dan 2.63, maka untuk mengetahui syarat *controllability* terpenuhi atau tidak dapat menggunakan Persamaan 2.67 berikut.

$$P = [CB : CAB : CA^2B : \dots : CA^{(n-1)}B : D] \quad (2.67)$$

Apabila matriks **P** diatas memiliki rank=n, maka sistem tersebut bersifat *controllable* atau dapat dikontrol. Sedangkan *observability* digunakan untuk melihat apakah suatu sistem dapat terukur atau tidak. Untuk syarat *observability* sistem dapat diketahui dengan Persamaan 2.70 berikut,

$$P = [C^T : A^T C^T : (A^T)^2 C^T : \dots : A^{T(n-1)} C^T] \quad (2.68)$$

Apabila matriks **P** diatas memiliki rank= n , maka sistem tersebut bersifat *observable*. Penting untuk diperhatikan bahwa, untuk melakukan pemasangan kontrol pada suatu sistem harus dipenuhi terlebih dahulu 3 syarat, yaitu sistem yang belum dikontrol harus *Controllable*, *Observable* dan *Stability (COS)*.



Gambar 2. 10 Diagram alur pemasangan kontrol

2.12 Bat Algorithm (BA)

Bat Algorithm (BA) merupakan algoritma *metaheuristik* yang terinspirasi dari perilaku kelelawar. Standart BA berdasarkan pada karakteristik ekolokasi atau biosonar pada microbat. BA diperkenalkan oleh Xin She. [6] [16]

2.12.1 Perilaku kelelawar

Kelelawar merupakan hewan yang sangat mengagumkan. Kelelawar merupakan satu-satunya mamalia yang sayap untuk terbang dan memiliki kemampuan canggih dalam ekolokasi. Kelelawar menggunakan tipe sonar yang disebut ekolokasi untuk mendeteksi makanan, menghindari rintangan dan mencari sarangnya dalam kegelapan. Kelelawar memancarkan pulsa bunyi dengan frekuensi tinggi dan mendengarkan gema yang memantul kembali dari objek di sekitarnya. Pulsa yang dipancarkan oleh kelelawar bervariasi dan dapat dihubungkan dengan strategi berburu hewan tersebut tergantung jenis spesies kelelawar itu. Kebanyakan kelelawar menggunakan frekuensi pendek sinyal termodulasi sekitar satu oktaf, sementara yang lain lebih sering menggunakan sinyal frekuensi konstan untuk ekolokasi. Sinyal bandwidth/ lebar pita dapat bervariasi tergantung pada spesies dan seringkali dapat meningkat secara harmonik. [16].

Meskipun masing-masing pulsa hanya berlangsung beberapa seperseribu detik (sekitar 8-10 ms), namun kelelawar memiliki frekuensi konstan di wilayah 25 kHz sampai 150 kHz. Kisaran frekuensi sebagian besar spesies kelelawar berada pada 25 kHz dan 100 kHz, meskipun beberapa jenis dapat memancarkan frekuensi hingga 150 kHz. Setiap pancaran suara ultrasonik 5 ms sampai 20 ms, kelelawar dapat memancarkan frekuensi 10 ms sampai 20 ms. Ketika berburu mangsa, tingkat emisi pulsa dapat meningkat hingga sekitar 200 pulsa per detik. Bahkan dalam studi menunjukkan waktu integrasi telinga kelelawar biasanya 300 mikro detik hingga 400 mikro detik. Kecepatan suara di udara $v=340$ m/s, dengan λ (panjang gelombang) dari pancaran suara ultrasonik dengan frekuensi f konstan didapatkan λ dimana jarak antara 2 mm sampai 14mm dari frekuensi 25 kHz sampai 150 kHz. Panjang gelombang tersebut dalam ukuran mangsa yang sama.

Dengan kemampuan ekolokasi yang canggih kelelawar dapat terbang di kegelapan malam mencari makanan tanpa menabrak sesuatu apapun. Dari karakteristik ekolokasi kelelawar tersebut, dapat dikembangkan algoritma yang terinspirasi dari perilaku kelelawar didasarkan pada tiga aturan ideal sebagai berikut:

- Kelelawar menggunakan ekolokasi untuk mensensor jarak dan membedakan antara makanan dan rintangan bahkan dalam kegelapan
- Kelelawar terbang secara acak untuk mencari makanan dengan kecepatan v_i pada posisi x_i dengan frekuensi tetap f_{min} variasi panjang gelombang λ_i dan tingkat kebisingan A_i untuk mencari makanan
- Tingkat kebisingan dapat bervariasi melalui beberapa cara, dapat diasumsikan tingkat kebisingan bervariasi dari maksimum (positif) (A_0) ke nilai konstan minimum (A_{min}).

2.12.2 Gerakan kelelawar

Masing-masing kelelawar berhubungan dengan kecepatan (v_i^t) dan posisi (x_i^t), iterasi t , dimensi (d) untuk mencari jarak/ruang yang diperbarui. Semua kelelawar mempunyai solusi terbaik (x_*). Ketiga aturan tersebut dapat dirumuskan menjadi persamaan dalam x_i^t dan kecepatan (v_i^t):

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta \quad (2.69)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^{t-1} - x_*)f_i \quad (2.70)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (2.71)$$

$\beta \in [0,1]$ merupakan vektor acak yang diambil dari distribusi seragam.

Panjang gelombang atau frekuensi untuk penerapannya, digunakan $f_{min} = 0$ dan $f_{max} = 1$ tergantung pada ukuran domain dari masalah yang diselesaikan. Awalnya kelelawar terbang acak dengan frekuensi seragam dari $[f_{min}, f_{max}]$. *Bat algorithm* dapat dipertimbangkan sebagai penalaan frekuensi untuk memberikan kombinasi yang seimbang dari penjelajahan tersebut. Kebisingan dan pulsa emisi pada dasarnya menyediakan sebuah mekanisme untuk kontrol secara otomatis dan auto zooming dengan solusi yang menjanjikan.

2.12.3 Kebisingan yang dipancarkan

Untuk mendapatkan hasil yang efektif, kelelawar harus mempunyai kebisingan (A_i) dan pancaran pulsa yang beragam selama iterasi. Biasanya kebisingan kelelawar berkurang setelah mendapat mangsa, ketika pancaran pulsa emisi meningkat kebisingan harus dipilih dengan nilai yang tepat antara A_{min} dan A_{max} , diasumsikan $A_{min}=0$ yang berarti kelelawar baru saja mendapat mangsa. Dan sementara berhenti memancarkan suara. Dengan asumsi tersebut, dapat ditulis sebagai,

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t, \quad r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (2.72)$$

α dan γ konstan. Untuk $0 < \alpha < 1$ dan $\gamma > 0$, sehingga didapat

$$A_i^t \rightarrow 0, \quad r_i^t \rightarrow r_i^0 \text{ dengan } t = \infty \quad (2.73)$$

Dalam kasus yang sederhana, kita bisa menggunakan $\alpha = \gamma$ dan bisa menggunakan $\alpha = \gamma = 0,9 - 0,98$ pada simulasi.

2.12.4 Pseudo code BA

Langkah utama dari BA adalah dimulai dari inisialisasi populasi sekumpulan kelelawar yang masing-masing ditentukan oleh posisi awal sebagai solusi awal. Populasi sekumpulan kelelawar membangkitkan pulsa dan kebisingan secara acak serta menentukan frekuensi. Selama proses berulang/*looping* kelelawar akan bergerak dari solusi awal menuju solusi terbaik. Setelah pindah, jika ada kelelawar menemukan solusi yang lebih baik, maka kelelawar akan memperbarui tingkat pancaran pulsa dan kebisingan. Selama proses iterasi solusi terbaik selalu diperbarui. Proses iterasi diulang sampai kriteria berhenti dan kriteria solusi terbaik

telah terpenuhi. Solusi terbaik adalah solusi bagi permasalahan yang diselesaikan oleh melalui proses algoritma ini.

Berikut ini adalah *Pseudo code* dari *Bat Algorithm* (BA) adalah sebagai berikut :

Fungsi Objektif $f(x)$, dengan $x=(x_1, \dots, x_d)^T$

Inisialisasi populasi Bat algorithm x_i , $i = 1, 2, \dots, n$, dan v_i secara acak

Definisikan frekuensi f_i dengan merujuk pada x_i

Inisialisasi tingkat pulsa r_i dan *loudness* (kebisingan) A_i secara acak

While ($t < \text{Maksimum Iterasi}$)

Bangkitkan solusi baru dengan mengatur frekuensi

Perbarui kecepatan dan lokasi/ solusi menggunakan persamaan berikut

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\beta$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^{t-1} - x_*)f_i$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t$$

if $\text{rand} > r_i$

Pilih solusi dari yang terbaik

Bangkitkan solusi lokal dari solusi terbaik yang terpilih

end if

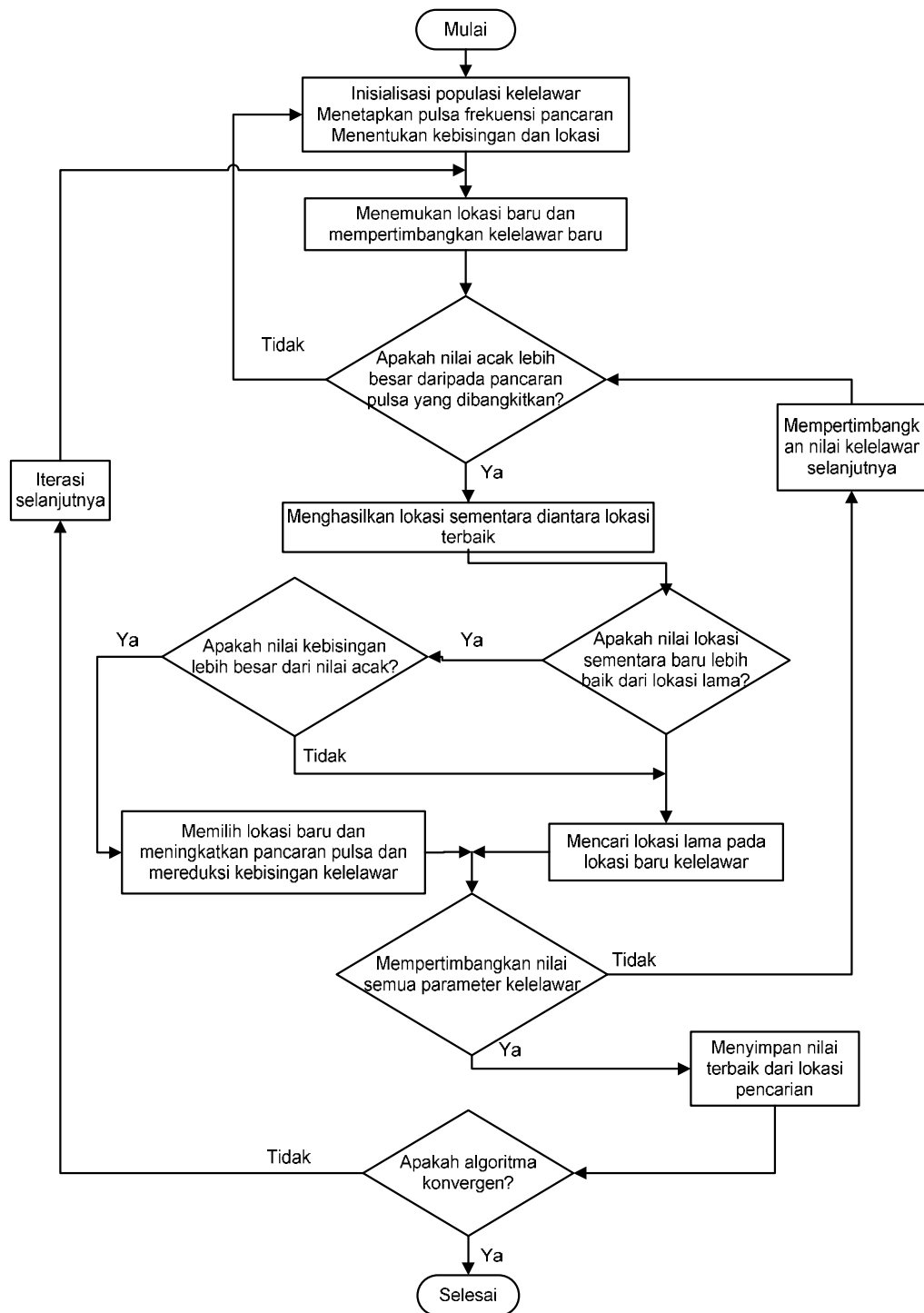
if ($\text{rand} < A_i$) && ($f(x_i) < f(x^*)$)

Didapatkan solusi baru

Naikkan nilai r_i dan kurangi nilai A_i

end if

end while



Gambar 2. 11 Flowchart Bat Algorithm

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 1

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik setiap tahun terus meningkat seiring perkembangan perkonomian dan perkembangan penduduk. Perubahan beban dan permintaan energi listrik yang terus meningkat harus diikuti dengan kualitas dari sumber tenaga listrik. Ketika terjadi perubahan kondisi antara permintaan dan penyaluran daya hal ini ditandai dengan muncul osilasi. Jika sistem berada pada keadaan stabil maka osilasi ini dapat diredam dalam rentang waktu singkat tetapi bila sistem tidak stabil maka osilasi terjadi dalam waktu yang cukup lama dan tidak dapat diredam.

Pada sistem pengaturan, eksitasi memegang peranan penting dalam mengendalikan kestabilan suatu pembangkit karena apabila terjadi fluktuasi beban maka eksitasi sebagai pengendali akan berfungsi mengontrol keluaran arus medan generator seperti tegangan dan faktor daya dengan cara mengatur kembali besaran-besaran input guna untuk mencari keseimbangan baru. Kestabilan dinamik merupakan faktor penting untuk kehandalan sistem tenaga listrik. Ketidakstabilan pada sistem sangat berbahaya karena dapat menyebabkan loss sinkronisasi dan kemudian menyebabkan *blackout*. Gangguan kestabilan terjadi pada seluruh sistem mulai dari pembangkit, saluran transmisi sampai saluran distribusi.

Secara garis besar terdapat dua macam kestabilan sistem yaitu kestabilan *steady state* dan kestabilan *transient*. Kestabilan *steady state* adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi mesin setelah mengalami gangguan kecil. Analisis kestabilan *steady state* menggunakan model linear. Sedangkan kestabilan *transient* adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar seperti sambaran petir maupun putus jaring transmisi. Analisis kestabilan *transient* menggunakan pendekatan non linear [1]. Selain itu menurut [2] kestabilan *steady state* dan kestabilan dinamik adalah sama. Perbedaannya hanya terletak pada masalah pemodelan. Pada kestabilan dinamik, sistem eksitasi turbin dan generator dimodelkan dengan menyediakan variasi fluks pada air gap mesin. Sementara pada kestabilan *steady state* digunakan model generator yang sederhana, u sebagai generator yang dipresentasikan sebagai sumber tegangan konstan [3].

Sistem tenaga listrik dalam skala besar merupakan sistem yang rentan terhadap gangguan. Demikian juga pada sistem interkoneksi Jawa-Bali 500 kV. Jaringan Jawa-Bali merupakan sistem interkoneksi yang menanggung beban besar. Jika terjadi perubahan pada sistem ini maka dapat menyebabkan terjadinya osilasi pada sistem. Sehingga untuk mengatasi osilasi, ditempatkan peralatan pembantu untuk meredam osilasi. Salah satu peralatan yang dipakai adalah *Power System Stabilizer* (PSS) yang dipasang pada AVR. Dengan menggunakan PSS osilasi pada sistem dapat diredam sehingga tidak menyebabkan generator bergeser dari kondisi stabil. Peredaman osilasi pada sistem interkoneksi sangat penting untuk keamanan operasi sistem. Secara umum ada 2 macam kontrol peredaman osilasi pada sistem tenaga: PSS (*Power System Stabilizer*) dan kontrol FACTS (*Flexible AC Transmission System*). Peralatan kontrol pada sistem tenaga listrik mampu bereaksi secara otomatis terhadap penyimpangan. Peralatan kontrol seperti governor, AVR (*Automatic Voltage Regulator*), dan sistem eksitasi menjadi peralatan kontrol yang harus dimiliki oleh sistem tenaga listrik agar kestabilan sistem tenaga listrik dapat dijaga [4]. Namun secara umum PSS banyak digunakan untuk meningkatkan kehandalan dan fungsi dari sistem tenaga selama operasi normal dan abnormal [5].

Sebuah metaheuristik algoritma baru yang dikenal dengan Bat Algorithm (BA) yang mempunyai sifat ekolokasi berdasarkan perilaku kelelawar. BA merupakan algoritma yang terinspirasi dari perilaku kelelawar (*Bat Behaviour*). Algoritma ini diperkenalkan oleh Xin-She Yang [6]. Pada penelitian ini diusulkan penalaan PSS yang optimal untuk sistem Jawa-Bali dengan menggunakan BA. Penalaan parameter yang optimal sangat berpengaruh dalam menstabilkan sistem.

BAB 2

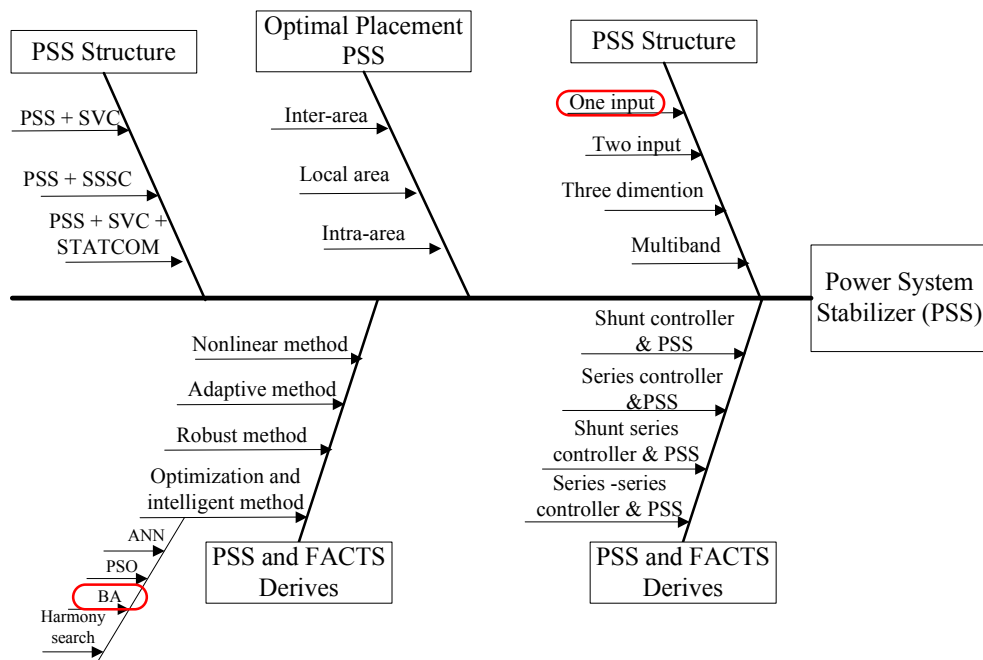
KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya

Beberapa penelitian yang telah dilakukan, antara lain:

- a) Desain adaptive PSS berbasis *Neural Networks* dan *PID controller* menggunakan *Imperialist Competitive Algorithm* (ICA). Hasil yang didapat dengan menggunakan *PID controller* memberikan respon yang lebih baik daripada PSS adaptive konvensional dan PSS konvensional. Penelitian ini dilakukan pada *Single machine* dan *Multimachine*. [7]
- b) Desain kontrol optimal PSS dan FACTS menggunakan *Craziness Particle Swarm Optimization* (CRPSO) pada sistem interkoneksi Jawa-Bali 500 kV [8], didapatkan hasil penalaan dengan menggunakan CRPSO dapat meningkatkan kestabilan sistem lebih baik dibanding dengan menggunakan metode PSO.
- c) Optimisasi *Dual Input Power System Stabilizer* (DIPSS) pada *multimachine Power System Stabilizer* (PSS) menggunakan *Ant Colony Optimization* (ACO) [9], didapatkan hasil respon perubahan frekuensi dengan *overshoot* dan *settling time* yang lebih baik dibanding dengan tanpa DIPSS dan DIPSS. Perubahan sudut rotor juga didapatkan hasil DIPSS-ACO lebih baik dibanding tanpa DIPSS dan DIPSS.
- d) Penalaan *Power System Stabilizer* (PSS) untuk perbaikan stabilitas dinamik pada sistem tenaga listrik menggunakan *Bat Algorithm* (BA) didapatkan hasil penalaan parameter PSS menggunakan BA untuk perbaikan stabilitas dinamik berfungsi untuk mempercepat *settling time* dan meredam *overshoot* respon perubahan frekuensi dan respon perubahan sudut rotor pada sistem tenaga listrik *Single Machine Infinite Bus* (SMIB) [10].
- e) Penalaan PSS menggunakan Bat algorithm lebih mampu meredam overshoot dibandingkan dengan menggunakan Genetic Algorithm (GA) dan Conventional PSS (CPSS) dilakukan pada sistem multimesin. [11].

Road map penelitian mengenai PSS dijelaskan pada gambar 2.1. [12]



Gambar 2. 1 *Fishbone* penelitian mengenai PSS

Berdasarkan penelitian terdahulu sehingga penulis mengajukan judul ‘Penalaan Optimal Power system stabilizer (PSS) menggunakan Bat Algorithm pada sistem kelistrikan Jawa-Bali 500 kV’.

2.2 Kestabilan sistem tenaga listrik

Kestabilan sistem tenaga listrik diartikan dengan kemampuan suatu sistem tenaga listrik atau bagian komponennya untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan jika terjadi gangguan. Selain terganggunya sinkronisasi dan keseimbangan, osilasi menunjukkan kondisi yang tidak stabil pada sistem.

Sistem tenaga listrik yang stabil mempunyai keseimbangan antara daya input mekanis (*prime mover*) dengan daya output elektrik. Dalam keadaan ini generator berputar pada kecepatan sinkron. Apabila terjadi kenaikan atau penurunan beban harus diikuti dengan perubahan daya input mekanis dari *prime mover*. Apabila perubahan ini tidak diikuti oleh perubahan daya mekanis dalam menyesuaikan beban dan rugi-rugi sistem, maka akan terjadi ketidakstabilan. Kecepatan rotor generator (frekuensi sistem) dan tegangan akan menyimpang dari keadaan normal. Sesaat, akan terjadi peredaman besar antara daya input dari prime mover dengan daya output

dari generator, terutama ketika terjadi gangguan. Generator akan mengalami percepatan atau penurunan putaran rotor. Bila tidak segera dihilangkan, maka percepatan atau penurunan rotor generator ini akan menyebabkan hilangnya sinkronisasi sistem.

Kestabilan sistem tenaga dapat dibedakan menjadi tiga kondisi, yaitu kestabilan *steady-state*, *transient* dan dinamik [4].

2.2.1 Kestabilan steady state

Kestabilan mantap (*steady state* atau *small signal stability*) yaitu kemampuan sistem untuk mencapai kondisi stabil yang baru atau identik dengan kondisi stabil sebelumnya setelah terjadi gangguan, atau kondisi dimana sistem dalam keadaan seimbang, yaitu daya listrik yang dibangkitkan generator harus seimbang dengan daya mekanis yang dihasilkan oleh turbin. Kestabilan ini ditandai dengan terjadinya gangguan berupa perubahan beban yang kecil, pengaturan yang kontinyu, dan pengaturan diskrit yang diberikan secara langsung [2]. Pemodelan sistem dapat dimodelkan secara linier untuk mengamati respon sistem [13].

2.2.2 Kestabilan transient

Stabilitas peralihan (*transient*) didefinisikan sebagai kemampuan dari sistem tenaga mempertahankan sinkronisasi transfer daya setelah mengalami gangguan besar yang bersifat mendadak selama beberapa saat yang menyebabkan penurunan nilai tegangan terminal secara signifikan. Gangguan besar ini misalnya putus jaringan, lepasnya beban, dan pengaturan *tap changer* sebelum *governor* bekerja. Gejala *transient* ini dikenali dengan respon sistem berupa amplitudo yang besar dan ketidakseimbangan torsi saat terjadi gangguan [2]. Untuk analisis kestabilan *transient* digunakan pendekatan model non linier

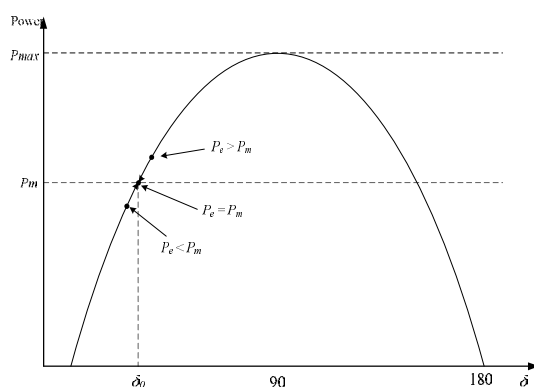
2.2.3 Kestabilan dinamik

Kestabilan dinamik sistem tenaga listrik adalah kestabilan sistem tenaga listrik akibat adanya perubahan beban yang sangat kecil. Kestabilan dinamik ini sama dengan kestabilan *steady-state* namun yang membedakan yaitu sistem eksitasi, turbin, dan generator dimodelkan dengan memperhitungkan variasi medan magnet

pada *air gap* mesin, sedangkan pada kestabilan *steady state* generator direpresentasikan sebagai sumber tegangan yang konstan atau tidak terjadi variasi *flux*. Sumber lain menyebutkan bahwa kestabilan ini berarti kemampuan sistem untuk tetap mempertahankan sinkronisasi setelah *initial swing* atau periode *transient* hingga kondisi titik keseimbangan *steady state* [2].

Dalam kestabilan dinamik *governor* sudah merespon terjadinya gangguan berupa membuka dan menutup untuk memberikan energi pada *prime mover* dan beberapa kontroler jaringan kembali beroperasi dalam keadaan normal. Setelah respon dari *governor* ini sudut rotor akan berosilasi hingga tercapai kondisi stabil sesuai dengan kondisi beban yang baru. Analisis ini penting karena sistem pada umumnya pada ayunan pertama atau *first swing* sudah stabil namun selama periode dinamik terjadi perubahan. Hal ini perlu diperhatikan untuk menghindari sistem menjadi tidak stabil.

Teknik penyelesaian masalah kestabilan transient dan dinamik adalah dengan menyelidiki kestabilan sistem itu terhadap perubahan kecil (*incremental*) di sekitar titik kesetimbangan.



Gambar 2. 2 Kurva hubungan sudut deviasi rotor (δ) dan Daya (P)

Pada Gambar 2.2 hubungan antara sudut deviasi rotor dari titik operasi *steady state* (δ) dan daya (P).

- Bila $P_e > P_m$ ($\delta > \delta_0$) maka rotor akan mengalami perlambatan
- Bila $P_e < P_m$ ($\delta < \delta_0$) maka rotor akan mengalami percepatan

Dari Gambar 2.2 dapat ditulis dalam Persamaan 2.1 sebagai berikut,

$$P_e = \frac{E'_g E_0}{X} \sin \delta_0 \quad (2.1)$$

Dengan,

P_e = Daya aktif yang disalurkan

X = Reaktansi transmisi dari terminal generator sampai *infinite bus*

E'_g = Tegangan internal generator

E_0 = Tegangan *infinite bus*

δ_0 = Sudut antara tegangan internal generator dengan *infinite bus*

Jika terjadi perubahan disisi beban, akan menyebabkan perubahan frekuensi dan tegangan sistem. Hal ini sesuai,

$$P_m - P_e = M \frac{d\omega}{dt} \quad (2.2)$$

bila $P_m > P_e \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} > 0$, sehingga ω akan naik dan f juga naik

bila $P_m < P_e \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} < 0$, sehingga ω akan turun dan f juga turun

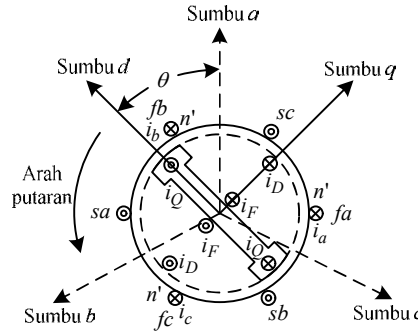
bila $P_m = P_e \Rightarrow \frac{d\omega}{dt} = 0$, sehingga ω akan konstan dan f juga konstan

2.3 Pemodelan Sistem Tenaga Listrik [14]

Dalam menyelesaikan permasalahan terkait dengan stabilitas sistem, diperlukan proses linearisasi besaran dan variabel-variabel yang digunakan sehingga besaran tegangan, arus, dan daya dapat berkaitan langsung terhadap kondisi nyata dari sistem. Terdapat dua macam pemodelan sistem, yaitu pemodelan nonlinear untuk sistem yang akan dianalisis berdasarkan responnya terhadap gangguan *transient* dan pemodelan linier untuk menganalisis pengaruh sistem terhadap gangguan dinamik yang terjadi. Untuk memodelkan generator sinkron dalam persamaan matematis dapat melalui transformasi *Park*. Model tersebut dibuat dengan asumsi sebagai berikut [29], seperti tahanan stator diabaikan, sistem dianggap seimbang dan kejenuhan inti diabaikan, serta beban diasumsi beban statik.

Transformasi Park adalah suatu metode penyederhanaan dalam membentuk suatu deskripsi matematika terhadap sebuah mesin sinkron melalui transformasi terhadap variabel yang digunakan. Melalui transformasi Park besaran pada stator seperti arus, tegangan dan kerapatan fluks ditentukan berdasarkan pada variable

sebenarnya dari kumparan (*winding*). Besaran kuantitas baru yang muncul diproyeksikan terhadap variabel sebenarnya (*actual*). Dari ketiga sumbu, yaitu yang pertama diproyeksikan sepanjang sumbu kumparan medan rotor yang disebut sebagai *direct axis*, yang kedua diproyeksikan terhadap sumbu natural dari kumparan medan yang disebut *quadratis axis*. Mesin sinkron dapat direpresentasikan dalam Gambar 2.3



Gambar 2. 3 Representasi mesin sinkron

Dari Gambar 2.3 dapat diperoleh Persamaan 2.3 dan Persamaan 2.4,

$$i_{qaxis} = \left(\frac{2}{3}\right) \left[i_a \sin \theta + i_b \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.3)$$

$$i_{daxis} = \left(\frac{2}{3}\right) \left[i_a \cos \theta + i_b \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (2.4)$$

Efek dari penggunaan transformasi *Park* dapat menyederhanakan transformasi semua nilai besaran stator dari fasa *a*, *b*, *c* ke dalam suatu besaran baru yang berada dalam lingkup sama dengan nilai yang berubah-ubah mengikuti perubahan rotor. Perlu dipahami bahwa disebabkan pada besaran yang baru hanya terdiri dari komponen *d* dan *q*, sedangkan untuk besaran yang sebelumnya terdapat komponen *a*, *b*, *c*. Maka untuk melakukan suatu transformasi arus misalnya dari *i_a*, *i_b*, dan *i_c* diperlukan suatu komponen baru yang kita definisikan dengan komponen urutan nol pada besaran yang baru. Sehingga,

$$i_{0dq} = P i_{abc} \quad (2.5)$$

Dengan *i_{0dq}* dan *i_{abc}* merupakan suatu besaran vektor

$$i_{0dq} = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \text{ dan } i_{abc} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Besaran P merupakan konstanta yang dinyatakan dalam persamaan 2.7

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Untuk memperoleh model linier dari mesin sinkron, terlebih dahulu dibentuk persamaan nonlinier yang terdapat pada mesin sinkron. Terdapat dua macam model persamaan nonlinier pada mesin sinkron yaitu perkalian nonlinier dan fungsi trigonometri. Dalam proses melakukan linearisasi pada suatu model kita memerlukan nilai inialisasi awal. Misalkan untuk memodelkan generator digunakan vektor *state space* x maka untuk inialisasi awal kita menggunakan variabel x_0 pada waktu $t=t_0$. Misalkan model arus:

$$x_0^t = [i_{d0} i_{F0} i_{D0} i_{q0} i_{Q0} \omega_0 \delta_0] \quad (2.8)$$

Ketika terjadi gangguan kecil pada $t=t_0^+$ maka titik kerja akan bergeser dari kondisi awal sesuai dengan Persamaan 2.9

$$x = x_0 + x_\Delta \quad (2.9)$$

Nilai dari x_0 tidak harus konstan, tetapi besarnya harus diketahui. Berdasarkan pada model dari *state space* maka dapat dituliskan dalam bentuk Persamaan 2.10,

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (2.10)$$

Dengan mengubah nilai x pada Persamaan 2.10 maka,

$$\dot{x}_0 + \dot{x}_\Delta = f(x_0 + x_\Delta, t) \quad (2.11)$$

Apabila Persamaan 2.11 tersebut dijabarkan, dengan menghilangkan bagian orde kedua yang dianggap bernilai kecil, misalnya nilai $x_{i\Delta}$ $x_{j\Delta}$ yang sangat kecil. Maka,

$$\dot{x}_0 + \dot{x}_\Delta \cong f(x_0, t) + A(x_0)x_\Delta + B(x_0)u \quad (2.12)$$

Kemudian dilakukan linearisasi sehingga menghasilkan Persamaan 2.13.

$$\dot{x}_\Delta = A(x_0)x_\Delta + B(x_0)u \quad (2.13)$$

Nilai dari elemen matriks A bergantung dari nilai awal dari vektor x_0 . Untuk studi dinamik, maka nilai ini dipertimbangkan konstan. Unsur-unsur dinamik sistem digambarkan sesuai dengan Persamaan (2.13) yang dihitung dari eigenvalue natural dari matriks A. State space akan berada dalam suatu n-dimensi. Model linear dari generator sinkron dinyatakan dalam persamaan sumbu d (dalam pu).

$$v_d = -r_i d - \omega L_q i_q - k\omega M_Q i_Q - L_d i_d - kM_F i_F - M_D i_D \quad (2.14)$$

Dengan $r=r_a=r_b=r_c$ adalah tahanan stator, L_d dan L_q adalah induktansi rotor, M_d dan M_q adalah *mutual inductance*. Selanjutnya proses linearisasi dituliskan:

$$(v_{d0} + v_{d\Delta}) = -r(i_{d0} + i_{d\Delta}) - (\omega_0 + \omega_\Delta)L_q(i_{q0} + i_{q\Delta}) - k(\omega_0 + \omega_\Delta)M_Q(i_{Q0} + i_{Q\Delta}) - L_d(i_{d0} + i_{d\Delta}) - kM_F(i_{F0} + i_{F\Delta}) - M_D(i_{D0} + i_{D\Delta}) \quad (2.15)$$

Apabila persamaan diatas diuraikan maka akan terbentuk Persamaan 2.16

$$(v_{d0} + v_{d\Delta}) = (-ri_{d0} - \omega_0 L_q i_{q0} - k\omega_0 M_Q i_{Q0} - L_d i_{d0} - kM_F i_{F0} - M_D i_{D0}) - ri_{d\Delta} - \omega_0 L_q i_{q\Delta} - i_{q0} L_q \omega_\Delta - \omega_0 kM_Q i_{Q\Delta} - i_{Q0} kM_Q \omega_\Delta - L_d i_{d\Delta} - kM_F i_{F\Delta} - M_D i_{D\Delta} \quad (2.16)$$

Bagian pada sisi kanan yang dikurung merupakan komponen v_{d0} sedangkan untuk komponen $v_{d\Delta}$ dapat disederhanakan sebagai berikut,

$$v_{d\Delta} = -ri_{d\Delta} - \omega_0 L_q i_{q\Delta} - \omega_0 kM_Q i_{Q\Delta} - (i_{q0} L_q + i_{Q0} kM_Q) \omega_\Delta - L_d i_{d\Delta} - kM_F i_{F\Delta} - M_D i_{D\Delta} \quad (2.17)$$

Sehingga persamaan 2.17 disederhanakan menjadi,

$$v_{d\Delta} = -ri_{d\Delta} - \omega_0 L_q i_{q\Delta} - \omega_0 kM_Q i_{Q\Delta} - \lambda_{q0} \omega_\Delta - L_d i_{d\Delta} - kM_F i_{F\Delta} - M_D i_{D\Delta} \quad (2.18)$$

Maka, dapat dilakukan proses linearisasi pada persamaan di sumbu q .

$$v_{q\Delta} = \omega_0 L_d i_{d\Delta} + \omega_0 kM_F i_{F\Delta} + \omega_0 kM_D i_{D\Delta} + (i_{d0} L_d + i_{F0} kM_F + i_{D0} kM_D) \omega_\Delta - ri_{q\Delta} - L_q i_{q\Delta} - kM_Q i_Q \quad (2.19)$$

Sehingga dapat disederhanakan menjadi,

$$v_{q\Delta} = \omega_0 L_d i_{d\Delta} + \omega_0 kM_F i_{F\Delta} + \omega_0 kM_D i_{D\Delta} + \lambda_{d0} \omega_\Delta - ri_{q\Delta} - L_q i_{q\Delta} - kM_Q i_Q \quad (2.20)$$

Linearisasi persamaan medan dan damper winding sebagai berikut,

$$-v_{F\Delta} = -r_F i_{F\Delta} - kM_F i_{d\Delta} - L_F i_{F\Delta} - M_R i_{D\Delta} \quad (2.21)$$

$$0 = -r_D i_{D\Delta} - kM_D i_{d\Delta} - M_R i_{F\Delta} - L_D i_{D\Delta} \quad (2.22)$$

$$0 = -r_Q i_{Q\Delta} - kM_Q i_{q\Delta} - L_Q i_{Q\Delta} \quad (2.23)$$

Linearisasi persamaan torka,

$$\begin{aligned} \tau_j \dot{\omega}_\Delta = & \left(\frac{1}{3} \right) (-L_d i_{q0} i_{d\Delta} - L_d i_{d0} i_{q\Delta} - kM_F i_{q0} i_{F\Delta} - kM_F i_{F0} i_{q\Delta} - kM_D i_{q0} i_{D\Delta} - \\ & kM_D i_{D0} i_{q\Delta} + L_q i_{d0} i_{q\Delta} + L_q i_{q0} i_{d\Delta} + L_q i_{q0} i_{d\Delta} + kM_Q i_{d0} i_{Q\Delta} + kM_Q i_{Q0} i_{d\Delta}) - \\ & D\omega_\Delta + T_{m\Delta} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Dapat juga dituliskan sebagai,

$$\begin{aligned} \tau_j \dot{\omega}_\Delta = & T_{m\Delta} - \left(\frac{1}{3} \right) ((L_d i_{q0} - \lambda_{q0}) i_{d\Delta} + (\lambda_{d0} - L_q i_{d0}) i_{q\Delta} - kM_F i_{q0} i_{F\Delta} - \\ & kM_D i_{q0} i_{D\Delta} + kM_Q i_{d0} i_{Q\Delta}) - D\omega_\Delta \end{aligned} \quad (2.25)$$

Dengan persamaan perubahan sudut rotor generator diberikan pada persamaan (2.26)

$$\dot{\delta}_\Delta = \omega_\Delta \quad (2.26)$$

Persamaan linear generator sinkron diatas ditulis dalam model matriks:

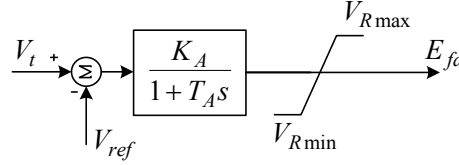
$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta v_d \\ -\Delta v_F \\ 0 \\ \Delta v_q \\ 0 \\ \Delta T_m \\ 0 \end{bmatrix} = & - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & \omega_0 L_q & \omega_0 kM_Q & \lambda_{q0} & 0 \\ 0 & rF & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & rD & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_0 L_d & -\omega_0 kM_F & -\omega_0 kM_D & r & 0 & -\lambda_{d0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & rQ & 0 & 0 \\ \frac{\lambda_{q0} - L_d i_{q0}}{3} & \frac{-kM_F i_{q0}}{3} & \frac{-kM_D i_{q0}}{3} & \frac{-kM_Q i_{d0}}{3} & \frac{kM_Q i_{d0}}{3} & -D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_F \\ \Delta i_D \\ \Delta i_q \\ \Delta i_Q \\ \Delta \omega \\ \Delta \delta \end{bmatrix} \\ & - \begin{bmatrix} L_d & kM_F & kM_D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ kM_F & L_F & M_R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ kM_D & M_R & L_D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_q & kM_Q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & kM_Q & L_Q & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\tau_j & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{i}_d \\ \Delta \dot{i}_F \\ \Delta \dot{i}_D \\ \Delta \dot{i}_q \\ \Delta \dot{i}_Q \\ \Delta \dot{\omega} \\ \Delta \dot{\delta} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.27)$$

2.4 Pemodelan Sistem Eksitasi [14] [4]

Sistem eksitasi merupakan peralatan yang berfungsi mengatur besar kecilnya arus medan pada generator. Pada penelitian ini yang digunakan adalah tipe *fast exciter* yang mempunyai respon cepat.

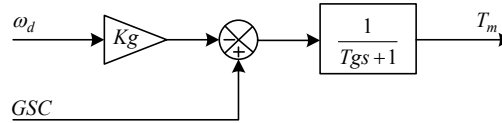
$$E_{fd} = K_A (V_t - V_{ref}) / (1 - T_A s) \quad (2.28)$$

K_A merupakan parameter penguatan dan T_A merupakan nilai konstanta waktu. Nilai output dari exciter dibatasi menggunakan blok saturasi, $V_{Rmin} < E_{fd} < V_{Rmax}$. Model exciter dalam bentuk blok diagram dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Sistem Eksitasi Fast Exciter

2.5 Pemodelan governor [4] [15]



Gambar 2. 5 Blok diagram governor

Besar torka mekanik T_m tergantung pada konstanta *speed drop*, transfer function governor dan sumber energi. Perubahan nilai T_m dihasilkan oleh perubahan kecepatan dan *speed reference* (*Governor Speed Control*). Apabila terjadi putaran rotor generator, maka governor akan memberikan umpan balik untuk memberikan keseimbangan baru. Bentuk dari diagram blok governor dapat dilihat pada Gambar 2.5.

Dalam model ini, diasumsikan nilai GSC adalah nol ($GSC=0$) dan efek penggabungan sistem turbin dengan speed governor menghasilkan daya mekanik P_m yang dapat dirumuskan pada Persamaan 2.29 berikut,

$$P_m = - \left[\frac{K_g}{(1 + T_g s)} \right] \omega_d \quad (2.29)$$

Dengan,

K_g = Konstanta Gain= $1/R$

T_g = Governor time konstan

R = Konstanta droop governor

2.6 Power system stabilizer (PSS) [4]

Berikut ini tinjauan singkat dari konsep dasar tentang kestabilan. Sistem daya secara umum dapat digambarkan sebagai sebuah persamaan aljabar dan persamaan diferensial nonlinear sebagai berikut,

$$d \frac{x}{dt} = \dot{x} = f(x, z) \quad (2.30)$$

$$y = h(x, z) \quad (2.31)$$

$$0 = y(y, z) \quad (2.32)$$

x adalah variabel keadaan, y adalah injeksi daya aktif dan reaktif, dan z adalah besar tegangan dan sudut rotor. Analisis dapat dilakukan dengan melinearkan sistem persamaan di sekitar titik operasi dengan kondisi $x=x(0)$, dan $y=y(0)$, dan $z=z(0)$ yang dinyatakan dengan,

$$x = x(0) + \Delta x \quad (2.33)$$

$$y = y(0) + \Delta y \quad (2.34)$$

$$z = z(0) + \Delta z \quad (2.35)$$

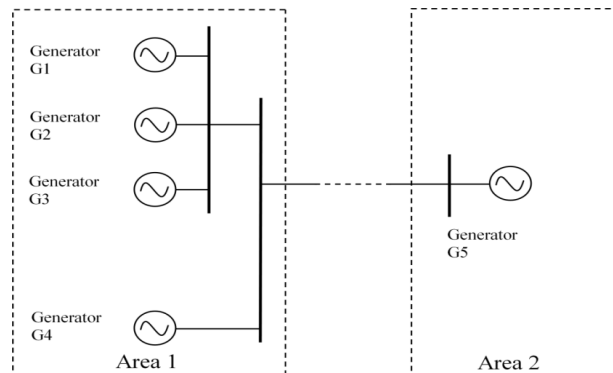
Sehingga diperoleh persamaan state space berikut,

$$\dot{\Delta x} = \mathbf{A} \Delta x \quad (2.36)$$

Δx adalah variabel sistem berdimensi $n \times 1$ dan \mathbf{A} adalah matriks sistem.

Kestabilan titik operasi dapat ditentukan dari lokasi eigenvalue matriks \mathbf{A} . Jika seluruh bagian nyata dari eigenvalue tersebut negatif maka sistem dinyatakan stabil. Jika eigenvalue mempunyai satu atau lebih bagian nyata yang positif, maka sistem dinyatakan tidak stabil. Berikut variasi mode dikelompokkan dalam 3 kategori [4]

- a. Mode Intra-plant bertempat hanya pada sebuah generator dalam sebuah plant yang berpartisipasi. Frekuensi osilasi mode ini, antara 1,5 - 3,0 Hz.
- b. Mode Lokal tempat beberapa generator dalam area tersebut yang berpartisipasi. Frekuensi osilasi pada mode ini adalah antara 0,8 - 1,8 Hz.
- c. Mode Interarea tempat banyak generator dalam area yang luas yang berpartisipasi. Frekuensi osilasi pada mode ini adalah kisaran 0,2 - 0,5 Hz.



Gambar 2. 6 Sistem Dua Area

Area 2 menggambarkan generator tunggal G_5 . Area 1 mempunyai 4 generator G_1 , G_2 , G_3 , dan G_4 . Generator G_1 , G_2 , dan G_3 dihubungkan secara paralel dan berpartisipasi dalam osilator intra-plant yang mempunyai frekuensi lebih tinggi, dan hasil reaksi lebih rendah diantara 3 mesin dan juga inersi yang lebih kecil. Ketidakstabilan timbul pada torque redaman negatif yang disebabkan oleh *exciter* aksi cepat di bawah kondisi operasi konstanta $K_5 < 0$ (berharga negatif). Oleh sebab hal itu, tujuan pemasangan PSS di sini adalah memberikan torque redaman tambahan tanpa mempengaruhi torque sinkron.

2.7 Pemodelan Power System Stabilizer [13] [4]

PSS banyak digunakan dalam sistem tenaga listrik untuk memperbaiki kestabilan dinamik, PSS digunakan sebagai kontroler sistem eksitasi untuk menambah redaman pada osilasi rotor. Untuk menghasilkan komponen redaman PSS memproduksi komponen torsi elektris yang sesuai dengan deviasi pada kecepatan rotor. PSS harus ditala dengan tepat, untuk membantu *exciter* dalam meredam osilasi dapat digambarkan dalam Gambar 2.7.

PSS menerima input berupa perubahan kecepatan rotor untuk menghasilkan sinyal tambahan sebagai kontroler *exciter*. *Exciter* mempengaruhi besar tegangan medan yang dihasilkan pada sisi rotor dan mempengaruhi besar fluks magnetik yang dibangkitkan. Fluks magnetik berbanding lurus dengan besar torka elektris yang dihasilkan pada mesin. Torka elektris melawan besar torka mekanik untuk meredam osilasi frekuensi yang terjadi pada mesin. [13]

2.7.2 Blok Washout

Washout filter berfungsi untuk menyediakan bias *steady state* output PSS yang akan memodifikasi tegangan terminal generator. PSS diharapkan hanya dapat merespon variasi *transient* dari sinyal kecepatan rotor generator dan tidak untuk sinyal DC offset. *Wash out filter* bekerja sebagai *high pass filter* yang akan melewatkan semua frekuensi yang diinginkan. Apabila hanya mode lokal yang diinginkan, nilai T_w dapat dipilih dalam range 1 sampai 2. Tetapi, jika mode interarea juga ingin diredam, maka nilai T_w harus dipilih dalam interval 10 sampai 20. Nilai T_w yang lebih tinggi dapat memperbaiki respon tegangan sistem selama *island operation*.

2.7.3 Blok Lead-Lag

Lead-Lag berfungsi sebagai penghasil karakteristik *phase-lead* yang sesuai untuk mengkompensasi *phase-lag* antara masukan eksitasi dan torsi generator

2.7.4 Limiter

Output PSS dibatasi agar aksi PSS pada AVR sesuai dengan yang diharapkan. Sebagai contoh, pada saat terjadi pelepasan beban, AVR beraksi untuk mengurangi tegangan terminal generator pada saat PSS menghasilkan sinyal kontrol untuk menaikkan tegangan (karena kecepatan rotor generator bertambah besar pada saat terjadi pelepasan beban). Pada kondisi ini sangat diperlukan untuk menonaktifkan PSS. Hal ini menunjukkan pentingnya pembatasan nilai sinyal output PSS yang dapat dilakukan oleh blok limiter. Perlu diperhatikan bahwa, nilai Batasan negatif yang tinggi dapat mengganggu kestabilan swing yang pertama

2.8 Reduksi Matriks Admitansi Jaring [14]

Reduksi matriks admitansi jaring adalah metode yang digunakan untuk mereduksi bus-bus selain bus generator. Metode tersebut dapat memudahkan dalam analisis sistem tenaga listrik dan dapat mengetahui hubungan antar generator. Untuk mempelajari reduksi jaring, diasumsikan bahwa jaring transmisi memiliki $n+m$ bus. Variabel n adalah jumlah bus generator dan m adalah jumlah bus non generator. Sehingga matriks Y_{BUS} sistem tenaga.

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} y_{1,1} & \cdots & y_{1,n+m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n+m,1} & \cdots & y_{n+m,n+m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & m \\ Y_1 & Y_3 \\ Y_2 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ m \end{matrix} \quad (2.38)$$

Jika masing-masing generator direpresentasikan sebagai sumber tegangan $E_i = |E_i| \angle \delta_i$ yang seri dengan reaktansi *transient* x_d' , maka x_d' dapat direpresentasikan sebagai admintansi y_i . Representasi ini dapat dilihat pada Gambar 2.9. Node bagian dalam generator diberi notasi 1, 2, ..., n dan nomor bus jaring sistem tenaga listrik diberi notasi n+1, ..., 2n+m, sehingga matriks admitansi jaring,

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} n & n & m \\ Y & -Y & 0 \\ -Y & Y_1 + Y & Y_2 \\ 0 & Y_3 & Y_4 \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ n \\ m \end{matrix} \quad (2.39)$$

Beban direpresentasikan sebagai admitansi konstan pada bus dengan notasi (n+1), ..., (2n+m). Nilai admitansi dari representasi beban dirumuskan,

$$Y_{Li} = \frac{P_{Li} - jQ_{Li}}{|V_i|^2}, \quad i = n+1, \dots, 2n+m \quad (2.40)$$

$|V_i|$ adalah magnitude dari phasor tegangan pada bus ke-i dan $P_{Li} + jQ_{Li}$ adalah beban pada bus ke-i. Sehingga, keseluruhan matriks Y_{BUS} dapat dituliskan,

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} n & n & m \\ Y & -Y & 0 \\ -Y & Y_1 + Y + Y_{Lg} & Y_2 \\ 0 & Y_3 & Y_4 + Y_{L\ell} \end{bmatrix} \begin{matrix} n \\ n \\ m \end{matrix} \quad (2.41)$$

Dengan matriks admitansi beban dituliskan sebagai berikut.

$$Diag(Y_{Li}) = \begin{bmatrix} n & m \\ Y_{Lg} & 0 \\ 0 & Y_{L\ell} \end{bmatrix} \begin{matrix} n, \quad i = n+1, \dots, 2n+m \\ m \end{matrix} \quad (2.42)$$

Y_{Lg} adalah admitansi beban pada bus generator dan Y_{Li} adalah admitansi beban pada bus beban. Sehingga, hubungan tegangan jangkar generator E dengan arus,

$$I = Y_{BUS} E \quad (2.43)$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_n \\ i_{n+1} \\ \vdots \\ i_{2n+m} \end{bmatrix} = Y_{BUS} \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_n \\ E_{n+1} \\ \vdots \\ E_{2n+m} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Nilai i yang masuk pada bus beban bernilai nol, sehingga :

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_n \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = Y_{BUS} \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_n \\ E_{n+1} \\ \vdots \\ E_{2n+m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_A & Y_B \\ Y_C & Y_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_n \\ E_{n+1} \\ \vdots \\ E_{2n+m} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} Y_A & Y_B \\ Y_C & Y_D \end{bmatrix} \begin{matrix} n & n+m \\ n & n+m \end{matrix} \quad (2.46)$$

Dengan, Y_A berukuran $n \times n$, Y_B berukuran $n \times (n+m)$, Y_C berukuran $(n+m) \times n$ dan Y_D berukuran $(n+m) \times (n+m)$. Dari Persamaan (2.45) dan (2.46), persamaan matriks admitansi jaring dapat dituliskan dalam bentuk Persamaan :

$$\begin{bmatrix} I_A \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_A & Y_B \\ Y_C & Y_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_A \\ E_D \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

$$I_A = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} \quad E_A = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \quad E_D = \begin{bmatrix} E_{n+1} \\ E_{n+2} \\ \vdots \\ E_{2n+m} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Sehingga,

$$I_A = Y_A E_A + Y_B E_D \quad (2.49)$$

$$0 = Y_C E_A + Y_D E_D \quad (2.50)$$

$$E_D = -Y_D^{-1} Y_C E_A \quad (2.51)$$

Dengan mensubstitusikan maka diperoleh,

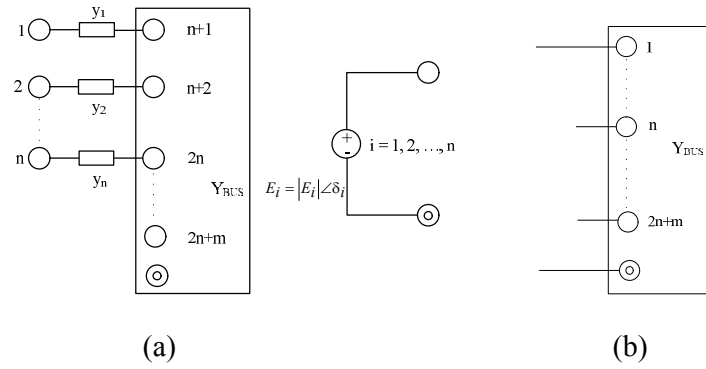
$$I_A = Y_A E_A + Y_B (-Y_D^{-1} Y_C E_A) \quad (2.52)$$

$$I_A = [Y_A - Y_B Y_D^{-1} Y_C] E_A \quad (2.53)$$

Untuk $I_A = [Y_{red}] E_A$, maka

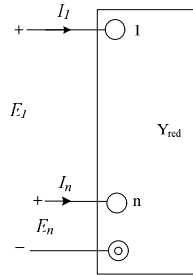
$$Y_{red} = [Y_A - Y_B Y_D^{-1} Y_C] \quad (2.54)$$

Dengan mereduksi matriks Y_{bus} menjadi matriks Y_{red} , topologi jaring yang sebenarnya tidak tampak. Tetapi, analisis sistem tenaga menjadi lebih sederhana.



Gambar 2.9 (a) Matriks Y_{BUS} , (b) Modifikasi Y_{BUS}

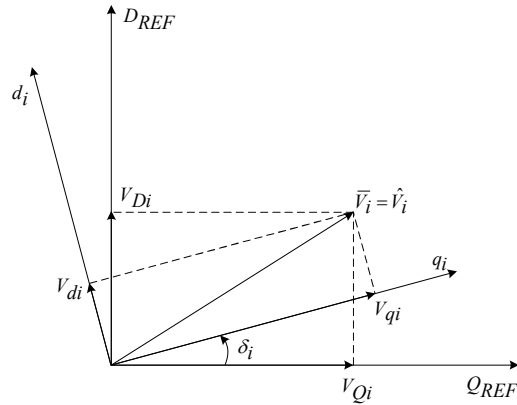
Dari sistem transmisi dan representasi generator dengan internal node 1, 2, ..., n . Dengan beban direpresentasikan sebagai impedansi konstan dan rektansi *transient* generator masuk ke dalam y_{bus} (Persamaan 2.54).



Gambar 2.10 Matriks Y_{red}

2.9 Konversi koordinat mesin ke referensi sistem [14]

Dalam model $D-Q$, dikenal dua istilah, yaitu referensi mesin yang ditulis dengan notasi $d-q$ kecil dan referensi sistem yang dinotasikan dengan $D-Q$ besar. Untuk memahami dan mengkonversi dua referensi yang berbeda ini, diberikan Gambar 2.12 untuk memudahkan dalam pemaparan



Gambar 2. 9 Nilai Tegangan V_i Dalam Referensi Dua Frame

Gambar 2.9 dapat dirumuskan suatu hubungan antara tegangan pada referensi mesin dan tegangan pada referensi jaring dalam Persamaan 2.58.

$$v_{Qi} + jv_{Di} = (v_{qi} \cos \delta_i - v_{di} \sin \delta_i) + j(v_{qi} \sin \delta_i + v_{di} \cos \delta_i) \quad (2.55)$$

$$\hat{v}_i = \hat{v}_i e^{j\delta_i} \quad (2.56)$$

Beberapa besaran sistem tenaga listrik dalam koordinat a , b , dan c , misal tegangan pada titik i adalah \mathbf{v}_{abci} . Dengan menggunakan Transformasi Park, koordinat \mathbf{v}_{abci} dapat diubah ke dalam koordinat \mathbf{v}_{dqi} . Tegangan dalam koordinat $d-q$ dapat dinotasikan dalam phasor \bar{V}_i , dengan rotor mesin ke- i sebagai referensi. Referensi rotor mesin ke- i dapat dinyatakan dalam referensi sistem $D-Q$ (dengan notasi tegangan \hat{V}_i) menggunakan persamaan 2.56. Persamaan tersebut digunakan untuk mengubah besaran-besaran yang semula dalam referensi rotor mesin ke- i ke dalam satu referensi sistem yang sama. Persamaan 2.56 dapat diperluas untuk setiap titik melalui Persamaan 2.57 berikut.

$$T = \begin{bmatrix} e^{j\delta_i} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{j\delta_i} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & e^{j\delta_i} \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

$$\hat{V} = \begin{bmatrix} V_{Q1} + jV_{D1} \\ V_{Q2} + jV_{D2} \\ \vdots \\ V_{Qn} + jV_{Dn} \end{bmatrix}, \quad \bar{V} = \begin{bmatrix} V_{q1} + jV_{d1} \\ V_{q2} + jV_{d2} \\ \vdots \\ V_{qn} + jV_{dn} \end{bmatrix}$$

Sehingga,

$$\hat{v}_i = T\hat{V}_i \quad (2.59)$$

Untuk $T^{-1} = T^*$ maka

$$\hat{V}_i = T\ddot{V}_i \quad (2.60)$$

Dengan cara yang sama, konversi untuk besaran arus sebagai berikut,

$$\ddot{I} = T\bar{I} \text{ dan } I = T\hat{I} \quad (2.61)$$

2.10 Stability [4] [13]

Kestabilan dianalisis menggunakan beberapa cara, yaitu analisis *eigenvalue*, analisis Routh Hurwith dan lain-lain. Untuk analisis tersebut, diperlukan model matematik dari sistem yang dianalisis. Dari model matematik yang diperoleh diubah ke dalam bentuk persamaan matriks keadaan, seperti pada Persamaan 2.62 dan 2.63.

Dengan,

Δx = Matriks keadaan ($n \times 1$)

Δy = Matriks variabel output ($m \times 1$)

u = Matriks variabel input ($r \times 1$)

A = Matriks sistem ($n \times n$)

B = Matriks input ($n \times r$)

C = Matriks pengukuran ($m \times n$)

D = Matriks input untuk output ($m \times r$)

Melalui matriks sistem A , kondisi kestabilan sistem dapat dipantau :

$$\text{Det}(sI - A) = 0 \quad (2.62)$$

Dengan I adalah matriks identitas dan s adalah *eigenvalue* dari matriks A .

Matriks A berukuran $n \times n$, sehingga banyaknya *eigenvalue* yang diperoleh sebanyak n , $\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$.

$$\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i \quad (2.63)$$

Frekuensi osilasi dalam Hz adalah

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.64)$$

Dengan,

λ_i = *Eigenvalue* ke- i

σ_i = Komponen riil dari *eigenvalue* ke- i

ω_i = Komponen imajiner dari *eigenvalue* ke-*i*

Berdasarkan nilai *eigenvalue* matriks A, kestabilan sistem dapat diketahui. Sistem dikatakan stabil jika bagian real dari *eigenvalue* bernilai negatif. Pengecekan kestabilan ini sangat penting dilakukan pada saat memasang peralatan kontrol pada suatu sistem. Dengan kata lain, sebelum memberikan kontrol pada suatu sistem, sistem yang akan dikontrol harus stabil. Setelah stabil, baru dipasang kontrol. Bagian riil *eigenvalue* merupakan komponen redaman, sedangkan bagian imajiner merupakan komponen osilasi. Nilai redaman dapat diketahui menggunakan nilai *damping ratio* (Persamaan 2.67). Sedangkan redaman sistem secara keseluruhan dapat diketahui dari nilai *Comprehensive Damping Index* (CDI) yang dirumuskan pada Persamaan 2.68 [15]

$$\zeta_i = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (2.65)$$

$$CDI = \sum_{i=1}^n (1 - \zeta_i) \quad (2.66)$$

Dengan,

ζ_i = *Damping ratio* ke-*i*

n = jumlah *eigenvalue*

2.11 Controllability dan Observability [4]

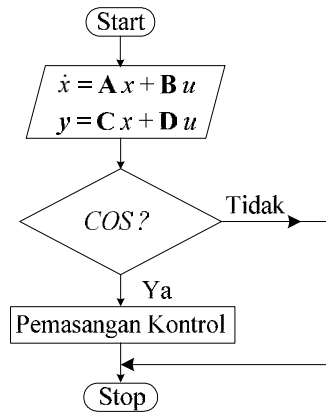
Sebelum melakukan langkah kontrol pada suatu sistem, penting untuk diketahui terlebih dahulu apakah sistem tersebut dapat dikontrol atau tidak. Apabila sistem telah memenuhi syarat *controllability* artinya sistem tersebut dapat dikontrol. Apabila sistem dinyatakan sesuai dengan Persamaan 2.62 dan 2.63, maka untuk mengetahui syarat *controllability* terpenuhi atau tidak dapat menggunakan Persamaan 2.67 berikut.

$$P = [CB : CAB : CA^2B : \dots : CA^{(n-1)}B : D] \quad (2.67)$$

Apabila matriks **P** diatas memiliki rank=n, maka sistem tersebut bersifat *controllable* atau dapat dikontrol. Sedangkan *observability* digunakan untuk melihat apakah suatu sistem dapat terukur atau tidak. Untuk syarat *observability* sistem dapat diketahui dengan Persamaan 2.70 berikut,

$$P = [C^T : A^T C^T : (A^T)^2 C^T : \dots : A^{T(n-1)} C^T] \quad (2.68)$$

Apabila matriks \mathbf{P} diatas memiliki $\text{rank}=\mathbf{n}$, maka sistem tersebut bersifat *observable*. Penting untuk diperhatikan bahwa, untuk melakukan pemasangan kontrol pada suatu sistem harus dipenuhi terlebih dahulu 3 syarat, yaitu sistem yang belum dikontrol harus *Controllable*, *Observable* dan *Stability (COS)*.



Gambar 2. 10 Diagram alur pemasangan kontrol

2.12 Bat Algorithm (BA)

Bat Algorithm (BA) merupakan algoritma *metaheuristik* yang terinspirasi dari perilaku kelelawar. Standart BA berdasarkan pada karakteristik ekolokasi atau biosonar pada microbat. BA diperkenalkan oleh Xin She. [6] [16]

2.12.1 Perilaku kelelawar

Kelelawar merupakan hewan yang sangat mengagumkan. Kelelawar merupakan satu-satunya mamalia yang sayap untuk terbang dan memiliki kemampuan canggih dalam ekolokasi. Kelelawar menggunakan tipe sonar yang disebut ekolokasi untuk mendeteksi makanan, menghindari rintangan dan mencari sarangnya dalam kegelapan. Kelelawar memancarkan pulsa bunyi dengan frekuensi tinggi dan mendengarkan gema yang memantul kembali dari objek di sekitarnya. Pulsa yang dipancarkan oleh kelelawar bervariasi dan dapat dihubungkan dengan strategi berburu hewan tersebut tergantung jenis spesies kelelawar itu. Kebanyakan kelelawar menggunakan frekuensi pendek sinyal termodulasi sekitar satu oktaf, sementara yang lain lebih sering menggunakan sinyal frekuensi konstan untuk ekolokasi. Sinyal bandwidth/ lebar pita dapat bervariasi tergantung pada spesies dan seringkali dapat meningkat secara harmonik. [16].

Meskipun masing-masing pulsa hanya berlangsung beberapa seperseribu detik (sekitar 8-10 ms), namun kelelawar memiliki frekuensi konstan di wilayah 25 kHz sampai 150 kHz. Kisaran frekuensi sebagian besar spesies kelelawar berada pada 25 kHz dan 100 kHz, meskipun beberapa jenis dapat memancarkan frekuensi hingga 150 kHz. Setiap pancaran suara ultrasonik 5 ms sampai 20 ms, kelelawar dapat memancarkan frekuensi 10 ms sampai 20 ms. Ketika berburu mangsa, tingkat emisi pulsa dapat meningkat hingga sekitar 200 pulsa per detik. Bahkan dalam studi menunjukkan waktu integrasi telinga kelelawar biasanya 300 mikro detik hingga 400 mikro detik. Kecepatan suara di udara $v=340$ m/s, dengan λ (panjang gelombang) dari pancaran suara ultrasonik dengan frekuensi f konstan didapatkan λ dimana jarak antara 2 mm sampai 14mm dari frekuensi 25 kHz sampai 150 kHz. Panjang gelombang tersebut dalam ukuran mangsa yang sama.

Dengan kemampuan ekolokasi yang canggih kelelawar dapat terbang di kegelapan malam mencari makanan tanpa menabrak sesuatu apapun. Dari karakteristik ekolokasi kelelawar tersebut, dapat dikembangkan algoritma yang terinspirasi dari perilaku kelelawar didasarkan pada tiga aturan ideal sebagai berikut:

- Kelelawar menggunakan ekolokasi untuk mensensor jarak dan membedakan antara makanan dan rintangan bahkan dalam kegelapan
- Kelelawar terbang secara acak untuk mencari makanan dengan kecepatan v_i pada posisi x_i dengan frekuensi tetap f_{min} variasi panjang gelombang λ_i dan tingkat kebisingan A_i untuk mencari makanan
- Tingkat kebisingan dapat bervariasi melalui beberapa cara, dapat diasumsikan tingkat kebisingan bervariasi dari maksimum (positif) (A_0) ke nilai konstan minimum (A_{min}).

2.12.2 Gerakan kelelawar

Masing-masing kelelawar berhubungan dengan kecepatan (v_i^t) dan posisi (x_i^t), iterasi t , dimensi (d) untuk mencari jarak/ruang yang diperbarui. Semua kelelawar mempunyai solusi terbaik (x_*). Ketiga aturan tersebut dapat dirumuskan menjadi persamaan dalam x_i^t dan kecepatan (v_i^t):

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta \quad (2.69)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^{t-1} - x_*)f_i \quad (2.70)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (2.71)$$

$\beta \in [0,1]$ merupakan vektor acak yang diambil dari distribusi seragam.

Panjang gelombang atau frekuensi untuk penerapannya, digunakan $f_{min} = 0$ dan $f_{max} = 1$ tergantung pada ukuran domain dari masalah yang diselesaikan. Awalnya kelelawar terbang acak dengan frekuensi seragam dari $[f_{min}, f_{max}]$. *Bat algorithm* dapat dipertimbangkan sebagai penalaan frekuensi untuk memberikan kombinasi yang seimbang dari penjelajahan tersebut. Kebisingan dan pulsa emisi pada dasarnya menyediakan sebuah mekanisme untuk kontrol secara otomatis dan auto zooming dengan solusi yang menjanjikan.

2.12.3 Kebisingan yang dipancarkan

Untuk mendapatkan hasil yang efektif, kelelawar harus mempunyai kebisingan (A_i) dan pancaran pulsa yang beragam selama iterasi. Biasanya kebisingan kelelawar berkurang setelah mendapat mangsa, ketika pancaran pulsa emisi meningkat kebisingan harus dipilih dengan nilai yang tepat antara A_{min} dan A_{max} , diasumsikan $A_{min}=0$ yang berarti kelelawar baru saja mendapat mangsa. Dan sementara berhenti memancarkan suara. Dengan asumsi tersebut, dapat ditulis sebagai,

$$A_i^{t+1} = \alpha A_i^t, \quad r_i^{t+1} = r_i^0 [1 - \exp(-\gamma t)] \quad (2.72)$$

α dan γ konstan. Untuk $0 < \alpha < 1$ dan $\gamma > 0$, sehingga didapat

$$A_i^t \rightarrow 0, \quad r_i^t \rightarrow r_i^0 \text{ dengan } t = \infty \quad (2.73)$$

Dalam kasus yang sederhana, kita bisa menggunakan $\alpha = \gamma$ dan bisa menggunakan $\alpha = \gamma = 0,9 - 0,98$ pada simulasi.

2.12.4 Pseudo code BA

Langkah utama dari BA adalah dimulai dari inisialisasi populasi sekumpulan kelelawar yang masing-masing ditentukan oleh posisi awal sebagai solusi awal. Populasi sekumpulan kelelawar membangkitkan pulsa dan kebisingan secara acak serta menentukan frekuensi. Selama proses berulang/*looping* kelelawar akan bergerak dari solusi awal menuju solusi terbaik. Setelah pindah, jika ada kelelawar menemukan solusi yang lebih baik, maka kelelawar akan memperbarui tingkat pancaran pulsa dan kebisingan. Selama proses iterasi solusi terbaik selalu diperbarui. Proses iterasi diulang sampai kriteria berhenti dan kriteria solusi terbaik

telah terpenuhi. Solusi terbaik adalah solusi bagi permasalahan yang diselesaikan oleh melalui proses algoritma ini.

Berikut ini adalah *Pseudo code* dari *Bat Algorithm* (BA) adalah sebagai berikut :

Fungsi Objektif $f(x)$, dengan $x=(x_1, \dots, x_d)^T$

Inisialisasi populasi Bat algorithm x_i , $i = 1, 2, \dots, n$, dan v_i secara acak

Definisikan frekuensi f_i dengan merujuk pada x_i

Inisialisasi tingkat pulsa r_i dan *loudness* (kebisingan) A_i secara acak

While ($t < \text{Maksimum Iterasi}$)

Bangkitkan solusi baru dengan mengatur frekuensi

Perbarui kecepatan dan lokasi/ solusi menggunakan persamaan berikut

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\beta$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^{t-1} - x_*)f_i$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t$$

if $\text{rand} > r_i$

Pilih solusi dari yang terbaik

Bangkitkan solusi lokal dari solusi terbaik yang terpilih

end if

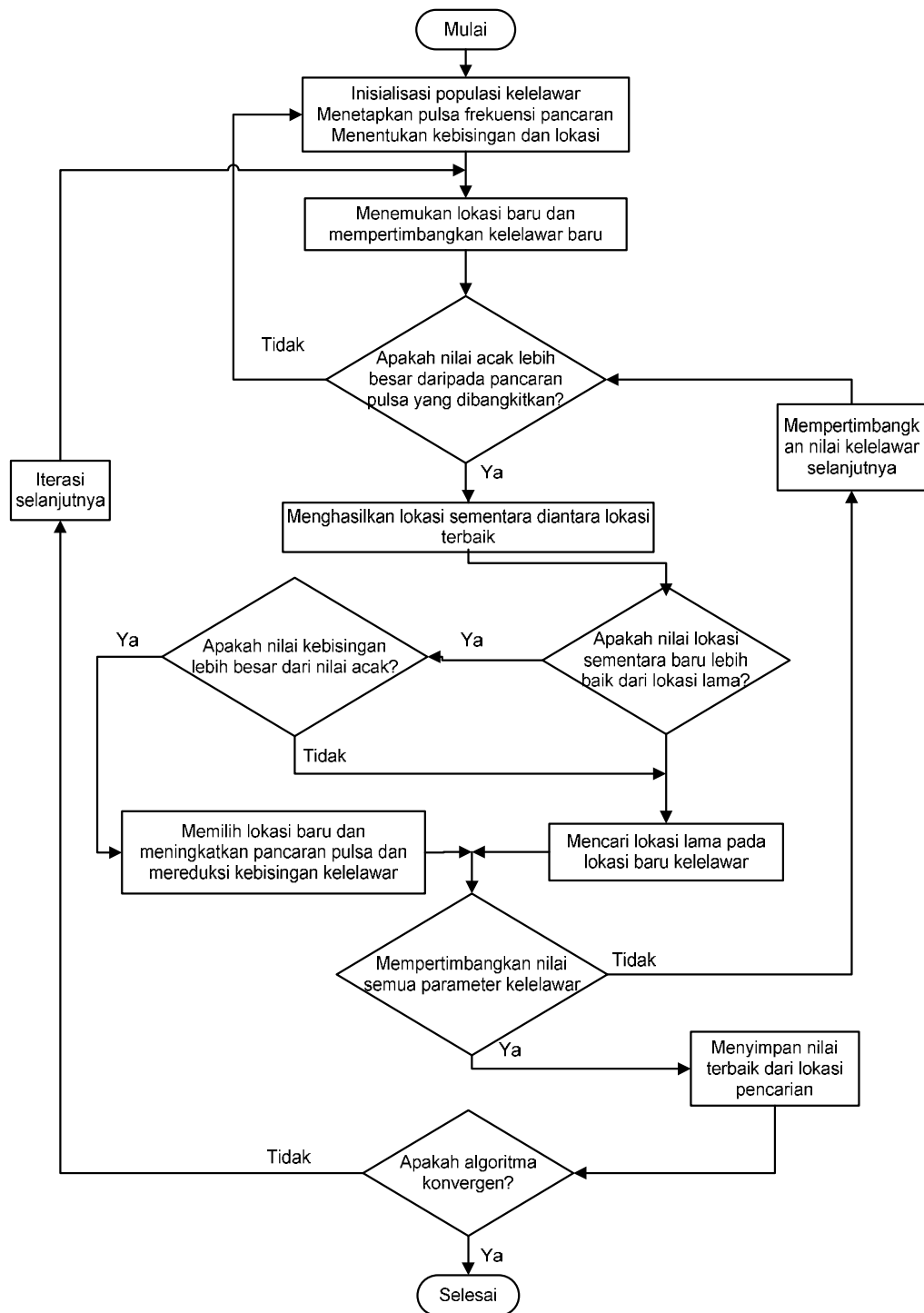
if ($\text{rand} < A_i$) && ($f(x_i) < f(x^*)$)

Didapatkan solusi baru

Naikkan nilai r_i dan kurangi nilai A_i

end if

end while



Gambar 2. 11 Flowchart Bat Algorithm

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi didapatkan bahwa gangguan pada satu pembangkit dapat mempengaruhi pembangkit yang lain apabila pembangkit itu terinterkoneksi. Penerapan PSS dengan menggunakan metode BA dapat memperbaiki kestabilan sistem walaupun tidak dipasang pada semua pembangkit. Penerapan PSS pada pembangkit Suralaya mampu meredam overshoot menjadi 0.00072 pu dan mempercepat settling time menjadi 5.1 detik. Dan perubahan beban pada pembangkit Saguling dapat diredam dengan menggunakan PSS-BA menjadi 0.00051 dan mempercepat *settling time* kurang dari 3 detik.

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya, Penerapan PSS bisa digunakan dalam gangguan transient dan dengan metode *Computational Intelligence* yang baru. Serta dapat dilakukan pada peralatan kontrol yang lain seperti STATCOM, UPFC, TCSC, FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission system*), SVC (*Static var compensation*) atau peralatan *energy storage* SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*), BES (*Battery energy storage*). Pada beberapa pembangkit osilasi sistem tidak dapat diperbaiki oleh sebab itu diharapkan pada penelitian selanjutnya diteliti mengenai penerapan PSS jika dipasang pada semua pembangkit untuk memperbaiki osilasi sistem.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K R Padiyar, "Power System Dynamic," *Interlaine Publising*, 1996.
- [2] William D Stevenson, *Element of power system analysis*. New York: McGraw-Hill International Book Company, 1982.
- [3] Milles R H Mallinowski, *Power system operation*. Singapore: mcGrawHill, 1994.
- [4] Imam Robandi, *Desain Sistem Tenaga Modern*. Yogyakarta: ANDI press, 2006.
- [5] G Shahgholian, "Review Of Power System Stabilizer: Application, Modeling, Analysis and Control Strategy," *IJTPE Journal*, pp. 41-52, 2013.
- [6] X S Yang, *Nature-Inspired metaheuristic algorithm*. University of Cambridge, United kingdom: Luniver Press, 2010.
- [7] Wibisono, *Desain adaptive PSS berbasis neural networks dan PID controller menggunakan imperialist competitive algorithm (ICA)*. Surabaya, Indonesia: Tugas Akhir departement of electrical engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2011.
- [8] Bamatraf Rifad Mubarak, *Desain kontrol optimal PSS dan FACTS menggunakan craziness particle swarm optimization pada sistem interkoneksi Jawa Bali 500 kV*. Surabaya, Indonesia: Tugas Akhir departement of electrical engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2010.
- [9] Fachruddin, *Optimisasi dual input power system stabilizer (PSS) menggunakan ant colony optimization (ACO)*. Surabaya, Indonesia: Tugas Akhir departement of electrical engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2013.
- [10] Suharto, *Penalaan power system stabilizer (PSS) untuk perbaikan stabilitas dinamik pada sistem tenaga listrik menggunakan Bat Algorithm (BA)*. Surabaya, Indonesia: Tugas Akhir departement of electrical engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015.

- [11] Ali E S, "Optimization of Power System Stability using BAT Search Algorithm," *Electrical Power and Energy System*, pp. 083-090, 2014.
- [12] Hasan fayazi Boroujeni, "Review of Power System Stabilizer Designing Method," *IJARAS*, vol. 3, pp. 77-83, 2012.
- [13] Prabha Kundur, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill Inc, 1994, vol. 12.
- [14] P M Anderson and Fuad, *Power system control and stability*:. John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- [15] Cai LJ, "Simultaneous Coordinated Tuning of PSS and FACTS Controller for damping Power System Oscillations in Multimachine System," in *IEEE Bologna Power Tech Conference*, Italy, 2003.
- [16] Xin-She Yang, "Bat Algorithm: Literatur Review and Application," *Int Journal Bio-inspired Computational*, pp. 1-10, august 2013.
- [17] Herlambang Setiadi, *Penalaan parameter Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) menggunakan Firefly Algorithm (FA) pada sistem tenaga listrik multimesin*. Surabaya, Indonesia: Tugas Akhir departement of electrical engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2014.
- [18] Adi Soeprijanto, *Desain Kontrroller untuk Kestabilan Dinamik Sistem Tenaga Listrik*. Surabaya: Itspress, 2012.
- [19] Graham Rogers, *power system oscillation*. New York: Kluwer Academic publisher, 2000.
- [20] Sebaa K, "Optimal location and tuning of robust power system and stabilizers using genetic algorithm," *IEEE*, vol. 79, no. 2, pp. 406-416, February 2009.
- [21] Eslami M, "Optimal location of PSS using improved PSO with chaotic sequence for optimal tuning and placement of PSS in power system," *Elsevier*.

BIOGRAFI PENULIS



Irna Tri Yuniahastuti dilahirkan di Magetan, 15 Juni 1991. Penulis adalah putri ketiga dari tiga bersaudara pasangan bapak Suparno dan Ibu Titik Irianti. Penulis menyelesaikan Sekolah di SDN 1 Kartoharjo, SMP Negeri 1 Barat, SMA Negeri 1 Barat, Kabupaten Magetan. Penulis melanjutkan pendidikan Strata-1 pada jurusan Pendidikan Teknik Elektro di Universitas Negeri Surabaya (UNESA) pada tahun 2009. Penulis melanjutkan pendidikan pascasarjana di Teknik elektro ITS pada tahun 2014. Selama menimba ilmu di ITS penulis merupakan member di Laboratorium Power System Operational and Control (PSOC) ITS Surabaya. Penulis dapat dihubungi pada nomor 085 73002769.